

Aus der Klinik für Neurologie  
der Medizinischen Fakultät Charité  
der Humboldt-Universität zu Berlin

## **DISSERTATION**

# **Einfluss von Spracherwerbsalter und Sprachleistungsniveau auf die kortikale Repräsentation von Grammatik und Semantik in der Erst- und Zweitsprache**

Zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor rerum medicarum  
(Dr. rer. medic.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät Charité  
der Humboldt-Universität zu Berlin

von  
Isabell Wartenburger  
aus Leipzig

Dekan: Prof. Dr. Joachim W. Dudenhausen

Gutachter:     1. Prof. Dr. A. Villringer  
                  2. Prof. Dr. Ch. Hock  
                  3. Prof. Dr. N. Kathmann

Datum der Promotion: 26.01.2004

**MEINEN ELTERN  
UND  
MEINEN BRÜDERN**

## **ABSTRAKT**

Ob es eine 'kritische Periode' beim Spracherwerb gibt oder nicht, wird kontrovers diskutiert. Die Untersuchung zweisprachiger Probanden mit unterschiedlichem Spracherwerbsalter und Sprachleistungsniveau in der Zweitsprache stellt eine gute Möglichkeit dar, diese Frage näher zu beleuchten. In der vorliegenden Studie nutzten wir die funktionelle Magnetresonanztomographie, um den Einfluss der Faktoren Spracherwerbsalter und Sprachleistungsniveau auf die neuronalen Korrelate grammatikalischer und semantischer Verarbeitungsprozesse bei italienisch-deutschsprachigen Probanden mit unterschiedlichem Spracherwerbsalter und Sprachleistungsniveau zu untersuchen. Während das zerebrale Aktivierungsmuster beim semantischen Urteilen größtenteils vom erreichten Sprachleistungsniveau abhängig war, beeinflusste das Spracherwerbsalter hauptsächlich die zerebrale Repräsentation grammatikalischer Verarbeitungsprozesse. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass beide, das Spracherwerbsalter und das Sprachleistungsniveau, die neuronalen Substrate der Verarbeitung der Zweitsprache beeinflussen, jedoch mit einem unterschiedlichen Effekt auf grammatikalische und semantische Verarbeitungsprozesse.

Schlagwörter:

Bilingualismus  
Zweitsprachverarbeitung  
Spracherwerbsalter  
Sprachleistungsniveau  
kritische Periode  
Grammatik  
Semantik  
funktionelle Magnetresonanztomographie

## ABSTRACT

The existence of a 'critical period' for language acquisition is still controversial. Bilingual subjects with variable age of acquisition and proficiency level constitute a suitable model to study this issue. In the present study, we used functional magnetic resonance imaging to investigate the effects of age of acquisition and proficiency level on neural correlates of grammatical and semantic judgments in Italian-German bilinguals who learned the second language at different ages and had different proficiency levels. While the pattern of brain activity for semantic judgment was largely dependent on the proficiency level, the age of acquisition mainly affected the cortical representation of grammatical processes. These findings support the view that both age of acquisition and proficiency level affect the neural substrates of second language processing, with a differential effect on grammar and semantics.

### Keywords:

- bilingualism
- second language processing
- age of acquisition
- proficiency level
- critical period
- grammar
- semantics
- functional magnetic resonance imaging

## DANKSAGUNG

Herrn Prof. Dr. med. K.M. Einhäupl möchte ich für die Überlassung des Promotionsthemas danken.

Besonders herzlich danke ich Prof. Dr. med. A. Villringer, dass er es mir ermöglicht hat in seiner Arbeitsgruppe mitzuarbeiten. Herzlich danken möchte ich auch für seine außerordentlich zuverlässige, motivierende und freundliche Betreuung und Unterstützung.

Mein ganz besonderer Dank gilt Dr. med. H.R. Heekeren für die intensive, stets konstruktive und freundschaftliche Betreuung dieser Arbeit, an deren Gelingen er einen höchst bedeutsamen Anteil hatte.

Sehr herzlich sei auch Prof. Dr. med. D. Perani, Prof. Dr. med. S.F. Cappa und Dr. med. J. Abutalebi aus Mailand für die kollegiale und freundliche Kritik und fruchtbare Zusammenarbeit gedankt.

Bei Prof. Dr. phil. R. De Bleser und Dr. phil. F. Burchert möchte ich mich herzlich bedanken für die effektive und außerordentlich lehrreiche Zusammenarbeit, Betreuung und Einarbeitung in linguistische Themen und Fragestellungen.

Weiterhin möchte ich mich bei allen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. med. A. Villringer bedanken, die mich von Anbeginn meiner Arbeit begleitet und äußerst hilfreich beraten haben und zu dem vorzüglich angenehmen und freundschaftlichen Klima in der Arbeitsgruppe beigetragen haben. Insbesondere die Mitglieder der Arbeitsgruppe Somatosensorik haben mir geduldig bei der Einarbeitung in die Methodik geholfen.

Herzlichst bedanken möchte ich mich auch bei S. Krausche, A. Felske und J. Schlüter, die mir bei allen organisatorischen Fragen exzellent behilflich waren.

Außerdem möchte ich allen Menschen danken, die sich die Zeit genommen haben, die Entwürfe zu dieser Arbeit zu lesen und zu diskutieren oder mich anderweitig unterstützt haben.

Auch über diese Arbeit hinaus wurde und werde ich finanziell unterstützt und möchte mich dafür ganz besonders beim Programm Nachwuchsförderung des Landes Berlin, der Europäischen Kommission, der Deutschen Forschungsgemeinschaft, dem Bundesministerium für Bildung und Forschung und dem Internationalen Leibniz Programm bedanken.

Schließlich sei allen Probanden gedankt, die sich geduldig bereitklärt haben, an dieser Studie teilzunehmen.

## ANMERKUNG

Im Rahmen meiner Tätigkeit als Doktorandin in der Arbeitsgruppe von Herrn Prof. Dr. med. A. Villringer sind u.a. in Kooperation zum *Institut für Linguistik* der Universität Potsdam und zum *Institute of Neuroscience and Bioimaging* der Universität San Raffaele Mailand folgende Publikationen unter meiner Mitwirkung entstanden:

### Originalarbeiten:

- Wartenburger, I., Heekeren, H.R., Abutalebi, J., Cappa, S.F., Villringer, A. & Perani, D. (2003). Early Setting of Grammatical Processing in the Bilingual Brain. *Neuron* 37 (1), 159:70.
- Wartenburger, I., Heekeren, H.R., Burchert, F., De Bleser, R. & Villringer, A. (2003). Grammaticality judgments on sentences with and without movement of phrasal constituents - an event-related fMRI-study. *Journal of Neurolinguistics* 16 (4-5), 301:14.
- Wartenburger, I., Heekeren, H.R., Burchert, F., Heinemann, S., De Bleser, R. & Villringer, A. (2004). Neural Correlates of Syntactic Transformations. *Human Brain Mapping*, im Druck.
- Heekeren, H.R., Wartenburger, I., Schmidt, H., Schwintowski, H.P. & Villringer, A. (2003). An fMRI Study of Simple Ethical Decision-Making. *Neuroreport* 14 (9) 1215:19.
- Cannestra, A.F., Wartenburger, I., Obrig, H., Villringer, A. & Toga, A.W. (2003). Functional assessment of Broca's area using near infrared spectroscopy in humans. *Neuroreport* 14 (15) 1961:65.

### Publizierte Kongressbeiträge (Abstracts):

- Cannestra, A.F., Wartenburger, I., Villringer, A. & Toga, A.W. (2001). Functional assessment of Broca's area using near infrared spectroscopy in humans. *Neuroimage* 13, 6: S514.
- Heekeren, H.R., Marschner, A., Mell, T., Bellgowan, P., Wartenburger, I. & Villringer, A. (2001). Perceptual decisions on colored patterns involve temporal and occipitotemporal temporal areas – an event-related fMRI-study. *Soc. for Neuroscience* 286.16.
- Heekeren, H.R., Wartenburger, I., Schmidt, H., Denkler, C., Schwintowski, H.P. & Villringer, A. (2001). The functional anatomy of moral judgment – an fMRI study. *Neuroimage* 13, 6: S417.
- Heekeren, H.R., Wartenburger, I., Schmidt, H., Denkler, C., Wagelaar, I., Schwintowski, H.P. & Villringer, A. (2001). An fMRI-study of moral judgment. *J Cogn Neurosci, Suppl.*, March, p. 50.
- Heekeren, H.R., Wartenburger, I. & Villringer, A. (2001). Representation of decision variables in human prefrontal cortex – an event-related fMRI-study. *Neuroimage* 13, 6: S418.
- Marschner, A., Heekeren, H.R., Mell, T., Kronfeldt, D., Wartenburger, I., Villringer, A., Reischies, F.M. (2002). Reward association learning modulates activity in dorsolateral prefrontal cortex during decision making processes – an event-related fMRI-study. *Neuroimage* 1077.

- Mell T, Heekeren HR, Marschner A, Wartenburger I, Kronfeldt D, Villringer A, Reischies FM. (2002). Assessing the functional neuroanatomy of reward processing using the probabilistic object reversal test – Part 2: fMRI. *J Cogn Neurosci, Suppl.*, April, p. 41.
- Wartenburger, I., Burchert, F., Heekeren, H.R., Wagelaar, I. De Bleser, R. & Villringer, A. (2001). Grammaticality judgments on sentences with and without movement of phrasal constituents - an event-related fMRI-study. *Neuroimage* 13, 6: S622.
- Wartenburger, I., Burchert, F., Heekeren, H.R., De Bleser, R. & Villringer, A. (2001). Judging the grammaticality of sentences with and without movement of phrasal constituents - an event-related fMRI-study. Vortrag bei der European Research Conference of the European Science Foundation: The Science of Aphasia, Giens 2001.
- Wartenburger, I., Wagelaar, I., Heekeren, H.R., Abutalebi, J., Perani, D., Cappa, S. & Villringer, A. (2001). Grammatical and semantic judgment in early and late bilinguals – an fMRI-study. *J Cogn Neurosci, Suppl.*, March, p. 131.
- Cannestra, A.F., Wartenburger, I., Villringer, A. & Toga, A.W. (2000). Functional assessment of Broca's area using near infrared spectroscopy in humans. *Soc. for Neuroscience*, p. 10.



# INHALTSVERZEICHNIS

1	<b>EINLEITUNG</b>	1
2	<b>STAND DER FORSCHUNG</b>	2
2.1	<b>Zum Begriff der Sprache</b>	2
2.1.1	Komponenten der Sprache: Semantik vs. Grammatik	2
2.2	<b>Entwicklung und Lokalisation der Sprache</b>	7
2.3	<b>Entwicklung und Lokalisation der Zweitsprache</b>	10
2.3.1	Ergebnisse von Läsions- und Stimulationsstudien, klinische und experimentelle Befunde	10
2.3.2	Ergebnisse funktionell bildgebender Verfahren	12
2.3.2.1	Einfluss des Sprachleistungsniveaus	14
2.3.2.2	Einfluss des Spracherwerbsalters	15
2.3.2.3	Zusammenfassung	16
2.4	<b>Fragestellung und Hypothesen</b>	18
2.4.1	Allgemeine Herangehensweise	18
2.4.2	Spezifische Fragestellung	19
2.4.3	Ziele und Hypothesen	19
2.4.3.1	Einfluss des Sprachleistungsniveaus	19
2.4.3.2	Einfluss des Spracherwerbsalters	20
3	<b>MATERIAL UND METHODEN</b>	22
3.1	<b>Neurovaskuläre Kopplung und funktionelle Magnetresonanztomographie</b>	22
3.2	<b>Stichprobe</b>	25
3.3	<b>Versuchsplan</b>	28
3.4	<b>Variablencharakteristik</b>	29
3.4.1	Abhängige Variablen	29
3.4.1.1	Stimulusmaterial	29
3.4.1.2	Aufgabe	30
3.4.1.3	FMRT Messung	31
3.4.2	Unabhängige Variablen	33
3.4.3	Kontrollvariablen	34
3.5	<b>Datenanalyse allgemein</b>	36
3.5.1	Analyse der demographisch-anamnestischen Daten und der Verhaltensdaten	36
3.5.2	Analyse der funktionell bildgebenden Daten	37
3.6	<b>Prüfung der Parallelität der Stichproben</b>	40
3.6.1	Demographisch-anamnestische Daten	40
3.6.2	Sprachhintergrund	40

4	<b>ERGEBNISSE</b>	43
4.1	<b>Verhaltensdaten</b>	43
4.2	<b>Ergebnisse der funktionell bildgebenden Untersuchung</b>	47
4.2.1	Konditionen vs. Ruhe	47
4.2.2	Vergleich der drei Gruppen untereinander	47
4.2.2.1	Grammatikalische Aufgabe	47
4.2.2.2	Semantische Aufgabe	49
4.2.3	Vergleich der Konditionen innerhalb der Gruppen	51
4.2.3.1	Grammatikalische Aufgabe	51
4.2.3.2	Semantische Aufgabe	54
4.2.4	Zu den Hypothesen	57
4.2.4.1	Zum Einfluss des Sprachleistungsniveaus	57
4.2.4.2	Zum Einfluss des Spracherwerbsalters	57
4.3	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse</b>	59
5	<b>DISKUSSION</b>	60
5.1	<b>Der Einfluss des Leistungsniveaus auf die kortikale Repräsentation der Zweitsprache</b>	61
5.1.1	Der Einfluss des Leistungsniveaus auf die semantische Verarbeitung	61
5.1.2	Der Einfluss des Leistungsniveaus auf die grammatikalische Verarbeitung	61
5.1.3	Die Komplexität der Aufgabe	62
5.1.4	Die Art der Aufgabe: Passive vs. aktive Verarbeitung	64
5.2	<b>Der Einfluss des Erwerbsalters auf die kortikale Repräsentation der Zweitsprache</b>	66
5.2.1	Der Einfluss des Erwerbsalters auf die semantische Verarbeitung	66
5.2.2	Der Einfluss des Erwerbsalters auf die grammatikalische Verarbeitung	68
5.2.3	Der Zusammenhang von Leistungsniveau und Erwerbsalter	70
5.3	<b>Einordnung in aktuelle Modelle der Zweitsprache</b>	72
5.3.1	Ein aktualisiertes Modell des Zweitspracherwerbs	75
6	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	77
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	79
	<b>VERZEICHNIS DER VERWENDETEN ABKÜRZUNGEN</b>	79
	<b>VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN UND TABELLEN</b>	90
	<b>ANHANG</b>	91
	<b>LEBENS LAUF</b>	94
	<b>EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG</b>	95

# **1 Einleitung**

Sprache ist eine höhere kognitive und spezifisch menschliche Fähigkeit von enormer Alltagsrelevanz. Sprache besteht aus verschiedenen Systemen. Zum Beispiel enthält das grammatikalische System einer Sprache die Regeln, wie Wörter miteinander kombiniert werden dürfen. Im semantischen System hingegen sind die Bedeutungen der Wörter gespeichert. Für Erwachsene ist es schwierig, eine neue Sprache zu erlernen. Kinder hingegen erwerben selbst mehrere Sprachen schnell und mühelos. Es wird angenommen, dass die Kindheit eine kritische, d.h. besonders günstige Phase für den Spracherwerb darstellt. Neben dem Alter beim Spracherwerb wirkt sich aber natürlich auch die Dauer und Intensität des Lernens und Umgangs mit der Sprache darauf aus, wie gut diese beherrscht wird.

In neuerer Zeit ist es möglich, mit bildgebenden Verfahren zu untersuchen, welche Hirnareale bei der Sprachverarbeitung beteiligt sind. Wesentliche Sprachfunktionen werden der linken Hemisphäre und insbesondere den frontalen und temporalen Arealen zugeschrieben. Werden zweisprachige Probanden untersucht, können einerseits Aussagen über die zerebrale Repräsentation der Erst- und Zweitsprache gemacht werden und andererseits kann untersucht werden, welche Faktoren die Repräsentation der Zweitsprache beeinflussen. In der vorliegenden Studie wurde mit Hilfe der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) untersucht, welchen Einfluss das Spracherwerbsalter und das Sprachleistungsniveau auf die zerebrale Repräsentation der Zweitsprache haben. Dabei wurden das semantische und grammatikalische System untersucht. Basierend auf den Ergebnissen wurde ein aktualisiertes Modell des Zweitspracherwerbs entwickelt.

## 2 Stand der Forschung

### 2.1 Zum Begriff der Sprache

Sprache ist ein menschliches Kommunikationssystem auf Basis strukturierter stimmlicher Laute, welche auch in andere Modalitäten (z.B. Schriftzeichen) umgewandelt werden können. Sie hat sich über Jahrtausende hinweg entwickelt und unterliegt ständigen Veränderungen. Unsere heutige Sprache unterscheidet sich z.B. wesentlich von der Sprache vor 100 Jahren, neue Wörter sind hinzugekommen, andere gingen verloren. Sprache stellt als höhere kognitive Fähigkeit eine definierende Fähigkeit des Menschen dar. Trotz des enormen wissenschaftlichen Fortschritts im letzten Jahrhundert ist jedoch noch immer nicht vollständig verstanden, wie wir Menschen dazu in der Lage sind, etwas so komplexes wie Sprache einfach zu erwerben und anzuwenden. Aufgrund seiner Komplexität wird das Konstrukt Sprache beschreibend in verschiedene Komponenten oder Systeme, z.B. die Grammatik und Semantik, unterteilt. Unter 2.1.1 wird näher auf diese beiden Begriffe eingegangen. Andere Komponenten der Sprache, wie z.B. Phonologie, Morphologie, Prosodie und Pragmatik, werden in der vorliegenden Arbeit nicht behandelt. In den Abschnitten 2.2 und 2.3 geht es um die Entwicklung und Lokalisation sprachrelevanter Areale im menschlichen Hirn. Der Schwerpunkt des Abschnitts 2.3 liegt dabei auf der Zweitsprache und den Faktoren, welche speziell die zerebrale Repräsentation der Zweitsprache beeinflussen. Unter 2.4 wird auf Basis der vorangegangenen Abschnitte die Fragestellung der vorliegenden Studie entwickelt.

#### 2.1.1 Komponenten der Sprache: Semantik vs. Grammatik

Die Sprache kann in verschiedene Systeme unterteilt werden. Zwei wesentliche Komponenten der Sprache sind die **Semantik**, das endliche mentale Lexikon, welches die Wörter und ihre Bedeutungen enthält, und die **Grammatik**, das Regelwerk, welches bestimmt, wie die Wörter zu unendlich vielen Sätzen kombiniert werden dürfen. Wie in den nächsten Abschnitten gezeigt wird, sind diese beiden Systeme zumindest teilweise voneinander unabhängig.

Die **Semantik** oder das semantische Lexikon umfasst eine begrenzte Zahl von Wörtern und ihre Bedeutung(en). Semantisches Wissen wird explizit erworben, durch Wiederholung können neu erworbene Wörter in den Langzeitspeicher überführt werden und sind so dem Gedächtnis in der Regel über viele Jahre hinweg zugänglich. Modellhaft kann man sich das semantische System auf neuronaler Ebene als ein Netzwerk vorstellen, in dem inhaltlich ähnliche oder zusammengehörende, z.B. häufig zusammen auftretende Wörter dicht nebeneinander stehen und stärker miteinander verknüpft sind als weiter entfernte Wörter. Die Wörter sind zudem in bestimmten Kategorien, z.B. der Kategorie „Tiere“, repräsentiert. Dieses Modell wird gestützt durch klinische und experimentelle Studien (für eine Übersicht (Caramazza und Hillis, 91; Caramazza und Shelton, 98)) sowie durch Daten aus theoretisch modellierten Netzwerken (Sigman und Cecchi, 02). Die Informationen, die im Lexikon gespeichert sind, werden ständig aktualisiert und mit anderen (neuen) Wörtern und Inhalten verknüpft. Zu der gespeicherten wortspezifischen Information gehört nicht nur die Bedeutung des Wortes an sich, sondern auch das Wissen darüber, wie das Wort ausgesprochen wird (phonologische Informationen), in welche grammatikalische Klasse es gehört und welche Funktion es hat (syntaktische Informationen) oder welche spezifischen Wortformen es gibt (z.B. ob es sich um eine irreguläre Form handelt oder ob bestimmte Argumente verlangt werden).

Die Regeln darüber, wie die einzelnen Wörter aus dem semantischen Lexikon zu sinnvollen Phrasen oder Sätzen zusammengefügt werden dürfen, sind in der **Grammatik** der Sprache festgelegt. Die Grammatik ermöglicht uns, aus dem begrenzten Wortschatz unendlich viele Sätze formulieren zu können sowie komplexe Sätze zu verstehen (Pinker, 94). In neueren Arbeiten wird allein die Grammatik bzw. die Fähigkeit, Regeln anzuwenden (Rekursion), als Sprache im engeren Sinne bezeichnet. Sie stellt damit eine spezifische und einzigartige Fähigkeit dar, die den Menschen von den nichtmenschlichen Tieren unterscheidet (Hauser et al., 02). Noam Chomsky entwickelte die Theorie der „Universellen Grammatik“, die jeder Sprache zugrunde liegt (Chomsky, 80). Auf Grund der angeborenen universellen Grammatik sind Kinder in der Lage, die Komplexität ihrer Muttersprache ohne explizite Instruktion oder analytische Fertigkeiten, sondern in aller Regel implizit zu erwerben. Und dies in einer sehr kurzen

Zeitspanne und trotz eines eher limitierten Sprachinputs<sup>1</sup> (Chomsky, 80); vergleiche auch (Ullman, 01a; Ullman, 01b).

Um diese erstaunliche Leistung zu erklären, wird in der Theorie der „Universellen Grammatik“ angenommen, dass spezifische Aspekte linguistischen Wissens genetisch determiniert bzw. dem Neugeborenen inhärent sein müssen. Die universelle Grammatik muss mit den Parametern der jeweiligen Sprache gefüllt werden und leitet den schnellen und effizienten Grammatikerwerb. Neben der Annahme eines solchen sprachspezifischen Systems, welches dem Kind innewohnt und somit einen angeboren „Sprachinstinkt“ (Pinker, 94) darstellt, gibt es aber auch Theorien, welche davon ausgehen, dass diese universellen Mechanismen nicht einzigartig oder spezifisch für Sprache sind, sondern diversen kognitiven Fähigkeiten zugrunde liegen (z.B. (Seidenberg, 97; Bates et al., 01)). Diese Autoren gehen davon aus, dass Sprache genau wie alle anderen Fähigkeiten über die allgemeinen Lernmechanismen Beobachtung, Konditionierung oder „Versuch und Irrtum“ erworben wird. Im Zuge der Diskussion um die Existenz einer kritischen Periode beim Spracherwerb (siehe 2.2) wird noch einmal auf diese Kontroverse eingegangen.

Neben theoretischen Annahmen sprechen auch klinische und experimentelle Befunde dafür, dass sich die neuronalen Korrelate der Grammatik und Semantik zumindest teilweise voneinander unterscheiden. So wird in neueren **Theorien** explizit formuliert, dass grammatikalische und semantische Verarbeitung zwei voneinander verschiedene Prozesse sind, da die grammatikalische Verarbeitung auf dem Wissen um die Regeln basiert, während semantisches Wissen aus einer finiten Quantität von Wörtern besteht (Paradis, 94; Pinker, 94; Ullman, 01a). Für den Erwerb der Grammatik ist die implizite Deduktion von Regeln aus dem -oft insuffizienten- Input notwendig, für die Semantik hingegen das Abspeichern, Erinnern und Wiedererkennen von Wörtern. Einige Autoren versuchen, aktuelle Gedächtnis- und Sprachmodelle zu verknüpfen und gehen davon aus, dass die grammatikalischen und semantischen Prozesse auf unterschiedlichen Gedächtnissystemen beruhen, nämlich dem nondeklarativ-prozeduralen impliziten Gedächtnissystem (Grammatik) und dem deklarativen expliziten Gedächtnissystem (Semantik) (Paradis, 94; Ullman et al., 97; Ullman, 01a; Ullman, 01b). Auch mit Hilfe evolutionstheoretischer Modelle konnte gezeigt werden, dass es Unterschiede in der Entwicklung von Semantik und Grammatik gibt (Komarova et al., 01; Nowak et al., 01; Nowak et al., 02).

---

<sup>1</sup> der Sprachinput ist nicht immer fehlerfrei und nicht erschöpfend; Kinder hören nicht alle Satzkonstruktionen, bevor sie diese produzieren können; Fehler werden nicht immer korrigiert

Verschiedene *elektrophysiologische –, Läsions –, und funktionell bildgebende Studien* weisen ebenfalls auf eine gewisse Unabhängigkeit grammatikalischer und semantischer Prozesse hin:

Ein Vielzahl von Läsions-Studien findet, dass eine Schädigung des Broca-Areals mit spezifischen syntaktischen Defiziten einhergeht wohingegen nach einer Schädigung des Wernicke-Areals vermehrt semantische Defizite auftreten (Naeser und Hayward, 78; Grodzinsky und Finkel, 98; Caplan, 01; Pinango und Zurif, 01); siehe auch Abbildung 1. Es gibt sowohl Patienten, welche ein erworbenes oder angeborenes spezifisches Defizit der Grammatik, nicht aber der Semantik haben als auch Patienten mit dem umgekehrten Störungsmuster (für eine Übersicht (Caplan, 92; Ullman et al., 97; van der Lely et al., 98; van der Lely und Christian, 00; Ullman, 01a; Lebrun, 02)). Damit ist gezeigt, dass die beiden Prozesse unabhängig voneinander gestört werden können.

Zudem zeigen vereinzelte Fallberichte über sogenannte „wilde Kinder“, welche während ihrer Kindheit komplett oder weitestgehend sprachdepriviert aufgewachsen sind, dass diese Kinder zwar in der Lage sind, Vokabeln (Semantik) zu erwerben, die Fähigkeit zu grammatikalischer Sprache jedoch defizitär bleibt (Kaspar-Hauser-Syndrom (Feuerbach, 32)) (Singh, 64; Curtiss, 77; Lebrun, 78; Lebrun, 80); für eine Übersicht siehe (Lebrun, 02). Dies weist darauf hin, dass auch die Entwicklung der beiden Prozesse selektiv gestört werden kann.

Aus elektrophysiologischen Studien ist bekannt, dass auch im gesunden Hirn der zeitliche Ablauf der Verarbeitung von Semantik und Grammatik unterschiedlich ist. Außerdem sind Grammatik und Semantik an verschiedenen Orten im Hirn repräsentiert. Es gibt eine Vielzahl elektrophysiologischer und funktionell bildgebender Studien, die substantielle Unterschiede zwischen grammatikalischen und semantischen Prozessen finden. In den meisten der Studien zeigt sich, dass die links frontalen Regionen eher mit grammatikalischer und die links temporalen Areale stärker mit semantischer Verarbeitung assoziiert sind. Einige der Studien werden im Folgenden exemplarisch dargestellt. Es konnte gezeigt werden, dass Sätze mit semantischen und grammatikalischen Anomalien unterschiedliche elektrische Potentiale hervorrufen (Osterhout, 97; Friederici et al., 99), und dass sich diese Unterschiede insbesondere in den frühesten Verarbeitungsschritten zeigen (Hahne und Friederici, 99; Gunter et al., 00). Diverse funktionell bildgebende Studien (Positronen-Emissions-Tomographie [PET] und funktionelle Magnetresonanztomographie [fMRT]) finden ebenfalls einen Unterschied in der kortikalen Repräsentation semantischer und grammatikalischer Prozesse: Das Broca-Areal ist spezifisch bei der Verarbeitung syntaktischer Informationen aktiviert (Dapretto und Bookheimer, 99). Dies konnte auch in anderen Studien bei verschiedenen Aufgabenstellungen bestätigt werden (Kang et al., 99; Embick et al., 00; Newman et al., 01; Roder et al., 02). Semantische

Aufgaben hingegen zeigen im Vergleich zu grammatikalischen Prozessen eine weniger starke Linkslateralisierung (Kang et al., 99), Aktivierungen in anterior zu Broca gelegenen Arealen (Dapretto und Bookheimer, 99; Friederici et al., 00) und eine größere Aktivierung in linken parahippocampalen und posterior perisylvischen temporalen Arealen (Newman et al., 01; Roder et al., 02). Auch wenn die Probanden gar nicht instruiert sind, grammatikalische oder semantische Urteile zu fällen, zeigen sich im Broca-Areal spezifische Aktivierungen durch syntaktische Anomalien („Bäume können gewachsen“<sup>\*2</sup>). In anderen Arealen, u.a. dem Wernicke-Areal, zeigen sich spezifische Aktivierungen durch das Verarbeiten semantischer Anomalien („Bäume können essen.“<sup>\*</sup>). Die Probanden waren instruiert, per Mausklick anzuzeigen, ob die Sätze belebte Substantive enthielten oder nicht. Es kann also davon ausgegangen werden, dass grammatikalische und semantische Fehler eher implizit verarbeitet wurden (Ni et al., 00). Bei der Grammatikalitätsbeurteilung von Pseudowort-Sätzen ohne semantische Bedeutung (z.B. „Der Donk der die Feumern lomen telchen das Grumel.“<sup>\*</sup>) zeigt sich ebenfalls eine Aktivierung im linken dorsolateralen präfrontalen Kortex, einer Region in Angrenzung an das Broca-Areal (Indefrey et al., 01).

Zusammenfassend weisen theoretische, klinische und experimentelle Studien auf fundamentale Unterschiede in Repräsentation und Verarbeitung von Semantik und Grammatik hin. Es scheint somit notwendig, das grammatikalische und semantische System getrennt voneinander zu untersuchen, will man Aufschlüsse über die Entwicklung und Verarbeitung „der Sprache“ erlangen.

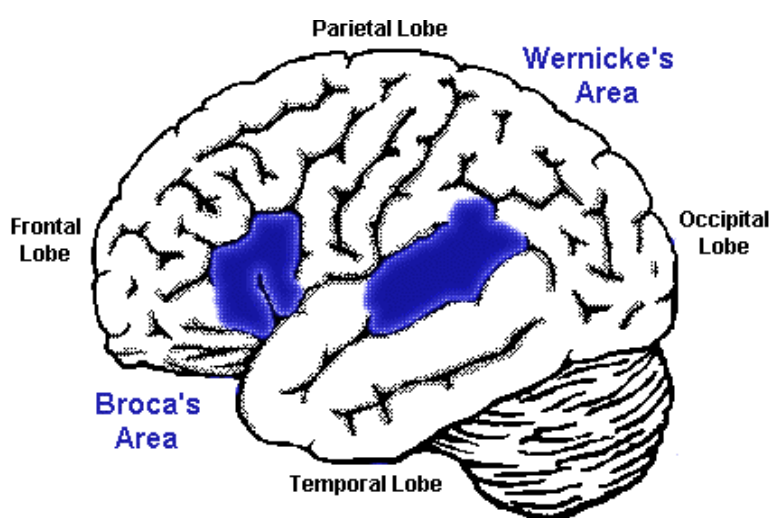
---

<sup>2</sup> ein \* kennzeichnet einen inkorrekten Satz



## 2.2 Entwicklung und Lokalisation der Sprache

Sprachliche Leistungen werden überwiegend der linken Hemisphäre zugeschrieben (Hiscock, 98). Dies wurde erstmals detailliert Ende des 19. Jahrhunderts anhand der Beschreibung aphasischer Patienten durch die Arbeiten von Broca (übersetzt durch (Berker et al., 86)), Dax (übersetzt durch (Joynt und Benton, 64), (Finger und Roe, 96)) siehe auch (Finger und Roe, 99)) und Wernicke (Wernicke, 74) beschrieben. Diese Befunde stehen in Übereinstimmung mit neueren Läsions- und Stimulationsstudien sowie funktionell bildgebenden Untersuchungen (Binder et al., 97; Friedman et al., 98; Schlosser et al., 98a; Schlosser et al., 98b; Schlosser et al., 99; Zahn et al., 00; Hund-Georgiadis et al., 01; Miller et al., 03). Abbildung 1 zeigt schematisch die Lage des Broca- und Wernicke-Areals in der linken Hemisphäre.



**Abbildung 1.**  
**Broca- und Wernicke-Areal.** Schematische Darstellung des inferioren frontalen Broca-Areals und des superioren temporalen Wernicke-Areals in der linken Hemisphäre (entnommen aus [http://www.stroke-info.com/wb\\_areas.htm](http://www.stroke-info.com/wb_areas.htm)).

Schon neugeborene Kinder beginnen, Sprache durch Kommunikation mit der Bezugsperson auf implizitem Weg zu erwerben. Es ist bekannt, dass Kinder schon im Alter von 3-4 Monaten hörbar mit der Sprachproduktion über das „babbeln“ von Vokalen beginnen, im Alter von 6

Monaten kommen Konsonanten und komplexere Lautkombinationen dazu. Ab dem 10.-12. Monat werden in der Regel erste bedeutungsvolle Worte artikuliert, das Sprachverständnis beginnt schon einige Wochen früher. Erste Wortkombinationen können im Alter von 18-20 Monaten beobachtet werden (Bates und Goodman, 97; Holowka und Petitto, 02). Neuere Befunde weisen darauf hin, dass bereits wenige Wochen alte Kinder über das „Schreien“ beginnen, Sprache und insbesondere die Prosodie zu erwerben und damit grundlegende Fundamente für den Spracherwerb legen (Papousek, 01; Lind und Wermke, 02; Wermke et al., 02). Bereits Neugeborene können die Stimme der Mutter von anderen weiblichen Stimmen unterscheiden und zeigen eine klare Präferenz für die Stimme der Mutter (DeCasper und Fifer, 80). Mittels evozierter elektrischer Potentialmessung (ERP) konnte gezeigt werden, dass Neugeborene relevante Phoneme -die kleinsten bedeutungsrelevanten Lauteinheiten der Sprache- identifizieren und von irrelevanten Phonemen diskriminieren können (Dehaene-Lambertz und Pena, 01), dass die Verarbeitung von Phonemen schon bei 3 Monate alten Kindern der von Erwachsenen ähnelt (Dehaene-Lambertz und Baillet, 98) und dass diese Kinder innerhalb von 400 ms auf phonetische Änderungen reagieren können (Dehaene-Lambertz und Dehaene, 94). Bei passiver Sprachwahrnehmung zeigen bereits 3 Monate alte Kinder ein ähnliches Muster an Hirnaktivierung wie Erwachsene (fMRT-Studie, (Dehaene-Lambertz et al., 02)).

Bei der Entwicklung der Sprache wird eine kritische oder sensible Phase innerhalb der ersten Lebensjahre postuliert, in der wir biologisch sensibilisiert sind, Sprache zu erlernen und nach deren Ende ein Spracherwerb nicht mehr oder nur teilweise möglich ist (Lenneberg, 67). Diese Annahme steht in Zusammenhang mit der unter 2.1.1 erwähnten Annahme einer angeborenen immanenten universellen Grammatik. Mathematische Simulationen und Modelle der Evolution einer universellen Grammatik zeigen, dass die natürliche Selektion zu einer zeitlich begrenzten Periode des Spracherwerbs führt (Hurford, 91; Komarova und Nowak, 01; Nowak et al., 01; Nowak et al., 02). Eine längere oder unbegrenzte Phase des Spracherwerbs ist nach diesen Modellen zu „kostenintensiv“ und deswegen von evolutionärem Nachteil. Die kritische Periode scheint sich insbesondere auf den Erwerb der Grammatik auszuwirken (DeKeyser, 00); vgl. dazu auch die Befunde der sogenannten „wilden Kinder“ unter 2.1.1.

Auf eine kritische Periode des Spracherwerbs weisen z.B. auch Befunde aus Untersuchungen mit gehörlosen Kindern hin. Es wurden die schweren Sprachdefizite eines Patienten beschrieben, welcher seit der Geburt gehörlos war und dessen Hörvermögen im Alter von 15 Jahren mit Hörhilfen korrigiert werden konnte (Grimshaw et al., 98). Die auch nach vier Jahren noch vorhandenen Defizite unterstützen die Hypothese der kritischen Periode. Je früher cochleare

Implantate bei tauben Kindern eingesetzt werden, desto besser ist deren spätere Sprachentwicklung (Kral et al., 01; Rubinstein, 02; Wu und Yang, 03).

Ein weiteres Argument für die kritische Periode basiert auf Befunden zur Funktionserholung nach zerebralen Schädigungen. Eine vollständige Funktionserholung ist möglich, wenn die Schädigung im frühen Kindesalter stattfindet (Bates et al., 97). Kinder mit später Hirnschädigung hingegen zeigen generell eine weniger gute Funktionserholung und ihre Defizite ähneln denen erwachsener Aphasiker (VanDongen et al., 85). Allerdings gibt es auch eine Fallstudie eines Patienten mit linkshemisphärischem Sturge-Weber-Syndrom, dessen stark retardierte Sprachleistungen im Alter von 8 Jahren denen eines 2-jährigen Kindes entsprachen. Dieser Patient machte nach linksseitiger Hemikortikoektomie und Absetzung der antikonvulsiven Medikation im 8. Lebensjahr noch erhebliche sprachliche Fortschritte und konnte im Alter von 15 Jahren klare, flüssige und grammatikalisch korrekte Sätze produzieren (Vargha-Khadem et al., 97).

Wann genau Anfangs- und Endpunkt der kritischen Periode zu setzen sind, bleibt unklar, denn die Zahlenangaben schwanken zwischen dem 6. Lebensjahr und der „Phase der Pubertät“ (Lenneberg, 67). Dies liegt darin begründet, dass es -glücklicherweise- sehr schwierig ist, Probanden zu finden, die bis zu einem bestimmten Alter *ohne* Sprache (d.h. auch ohne jegliche Art von Zeichensprache oder Kommunikation über Gestik und Mimik) aufgewachsen sind. Es ist daher schwierig, den kritischen Zeitpunkt genau zu bestimmen. Auf Grund dieser unklaren Definition unterscheiden sich viele Studien bezüglich des kritischen Alters, und dementsprechend uneinheitlich bis widersprüchlich ist die Befundlage.

Ein etabliertes Modell, welches erlaubt, generelle Theorien und Fragestellungen zu Sprachentwicklung und Spracherwerb zu verifizieren, ist der Zweitspracherwerb. Beispielsweise kann der Effekt des Spracherwerbsalters systematisch untersucht werden, indem Probanden miteinander verglichen werden, die mit unterschiedlichem Alter die Zweitsprache erlernt haben. Im Folgenden wird auf Studien eingegangen, welche u.a. die Frage nach der kritischen Periode beim Spracherwerb anhand der Untersuchung mehrsprachiger Probanden näher beleuchten.

## 2.3 Entwicklung und Lokalisation der Zweitsprache

Auf Grund der Hypothese der kritischen Periode beim Erstspracherwerb wurde der Einfluss des Alters auf den Zweitspracherwerb viel und kontrovers diskutiert (Johnson und Newport, 89; Palij, 90; Johnson und Newport, 91; Flege et al., 95; Flege et al., 96; Weber-Fox und Neville, 96; Kim et al., 97; Mayo et al., 97; Perani et al., 98; Bialystok und Miller, 99; Chee et al., 99; Flege et al., 99a; Flege et al., 99b; Birdsong und Molis, 01; Pallier et al., 03).

### 2.3.1 Ergebnisse von Läsions- und Stimulationsstudien, klinische und experimentelle Befunde

Der Zusammenhang zwischen Erst- und Zweitsprache bzw. ihrer Repräsentation im Gehirn wurde mittels verschiedener Methoden untersucht. Es gibt multiple Befunde für eine separate Repräsentation der Zweitsprache, insbesondere, wenn diese erst spät erlernt wurde.

**Klinische Untersuchungen** berichten z.B. von einem Fall, bei dem es nach einem hirnochirurgischen Eingriff zu stärkeren Benenndefiziten in der Erst- als in der Zweitsprache kam (Gomez-Tortosa et al., 95). Es werden Sprachwechsel zwischen Erst- und Zweitsprache während epileptischer Anfälle beschrieben (Schwartz, 94). Bei mehrsprachigen Aphasiepatienten kann es zu selektiven Störungen nur einer Sprache kommen. Neben nichtparallelen Erholungsmustern beider Sprachen werden u.a. folgende Störungsbilder beobachtet: Selektive Aphasie nur einer Sprache, selektive Erholung nur einer Sprache, sprachspezifische Dissoziation zwischen Sprachproduktion und -rezeption, pathologisches Wechseln (engl. switchen) zwischen den Sprachen sowie diverse Übersetzungsstörungen (Aglioti und Fabbro, 93; Ramamurthi und Chari, 93; Paradis, 95; Aglioti et al., 96; Paradis, 00; Fabbro, 01a); (siehe (Fabbro, 01b) für eine Übersicht).

Auch **experimentelle Untersuchungen**, z.B. die elektrische Stimulation spezifischer Hirnareale oder Ableitung des Elektroenzephalogramms (EEG), geben Aufschluss über die zerebrale Organisation der Erst- und Zweitsprache. Bei mehrsprachigen Probanden führt eine elektrische Stimulation bestimmter Hirnareale zu einer selektiven Störung nur einer Sprache (Ojemann und Whitaker, 78; Ojemann, 83; Black und Ronner, 87). Es zeigen sich sprachspezifische EEG-Veränderungen bei Übersetzungsaufgaben (Petsche et al., 93).

Weber-Fox und Neville (Weber-Fox und Neville, 96) leiteten bei bilingualen Probanden mit unterschiedlichem Alter bei Zweitspracherwerb evozierte Potentiale (ERP) ab und maßen die Reaktionszeiten und Antworten bei grammatikalischen und semantischen Entscheidungsaufgaben. Dabei zeigt sich, dass Semantik und Grammatik differentiell durch das Alter beim Zweitspracherwerb beeinflusst werden. Die grammatikalische Verarbeitung ist stärker vom Alter bei Zweitspracherwerb (im Folgenden Erwerbsalter) abhängig als die semantische Verarbeitung. Im Vergleich zu monolingualen Probanden bzw. Probanden, die beide Sprachen seit der Geburt erworben haben, führt bei grammatikalischen Aufgaben bereits ein Erwerbsalter von 1-3 Jahren zu schlechteren Leistungen und veränderten ERP-Komponenten. Bei semantischen Aufgaben hingegen zeigt sich dies nur bei Probanden mit einem Erwerbsalter von mehr als 11 Jahren. Diese Studie liefert erste Hinweise für einen differentiellen Einfluss des Erwerbsalters auf die semantische und grammatikalische Verarbeitung der Zweitsprache.

Eine Untersuchung der Reaktionszeit und –tendenz grammatikalischer Entscheidungen konnte keinen Einfluss des Erwerbsalters auf das Leistungsniveau in der Zweitsprache finden. Die Probanden hatten ihre Zweitsprache vor oder nach dem 15. Lebensjahr erlernt (Bialystok und Miller, 99). Der zentrale Unterschied zwischen beiden Studien ist, dass bei Bialystok und Miller (Bialystok und Miller, 99) der kritische Wert zwischen frühem und spätem Spracherwerb sehr hoch auf größer/kleiner 15 Jahre festgelegt wurde, wohingegen die oben genannte Studie von Weber-Fox und Neville (Weber-Fox und Neville, 96) gerade bei grammatikalischen Prozessen einen kritischen Wert von nur 3 Jahren fand. Es ist also möglich, dass der Effekt des Alters in der Studie von Bialystok und Miller (Bialystok und Miller, 99) auf Grund der Gruppeneinteilung verwischt ist.

In früheren Verhaltensstudien mit Bilingualen zeigen sich negative Korrelationen zwischen dem Alter bei Zweitspracherwerb und den Zweitsprachfähigkeiten (Palij, 90). Auch bei grammatikalischen Aufgaben haben diejenigen mit frühem Zweitspracherwerb eindeutig bessere Leistungen, und dies unabhängig von Menge an Erfahrungen, Motivation, Selbstbewusstsein oder Identifikation mit dem Zweitsprachland (Johnson und Newport, 89). Dieser Zusammenhang gilt ebenso für universelle Eigenschaften der Sprache (Bildung von wh-Fragen im Englischen; (Johnson und Newport, 91)). In einer Replikationsstudie zu Johnson und Newport (Johnson und Newport, 89) konnte gezeigt werden, dass die negative Korrelation zwischen Erwerbsalter und grammatikalischer Leistung auch nach dem Ende der vermuteten kritischen Periode fortbesteht und dass es Probanden gibt, die trotz eines späten Erwerbsalters ein sehr gutes (muttersprachliches) Leistungsniveau erreichen (Birdsong und Molis, 01). Die Autoren schlussfolgern, dass es zwar einen Einfluss des Erwerbsalters gibt, dieser aber kontinuierlich

wirksam ist und nicht nur innerhalb einer bestimmten kritischen Phase, und dass der Effekt des Alters durch viel Übung auch überwunden werden kann.

Bei auditiver Sprachrezeption unter Störbedingungen konnte gezeigt werden, dass monolinguale Kinder und Kinder mit frühem Zweitspracherwerb Sprache unter signifikant stärkerem Hintergrundlärm verstehen können und Kontextinformationen besser nutzen können als bilinguale Kinder mit spätem Zweitspracherwerb (Mayo et al., 97). Das Alter beim Zweitspracherwerb hat auch einen Einfluss auf die Fähigkeit, neue phonetische Kategorien zu bilden (Flege et al., 96; Flege et al., 99a) und die Zweitsprache akzentfrei zu sprechen (Flege et al., 95; Flege et al., 99b). Die zusätzlich gefundene negative Korrelation des Erwerbsalters zu grammatikalischen und morphosyntaktischen Fähigkeiten ist abhängig von der Länge der Ausbildung in der Zweitsprache und dem Ausmaß, mit welchem die Zweitsprache benutzt wird (Flege et al., 99b).

Zusammenfassend wurde in den meisten Studien ein starker Effekt des Erwerbsalters auf das sprachliche Leistungsniveau gefunden. Einige Befunde sprechen für den Einfluss einer kritischen Periode auf den Zweitspracherwerb. Im folgenden Absatz werden neuere Ergebnisse funktionell bildgebender Untersuchungen erläutert.

### **2.3.2 Ergebnisse funktionell bildgebender Verfahren**

Die Befunde der Läsions- und Stimulationsstudien weisen darauf hin, dass Erst- und Zweitsprache (L1 und L2) in verschiedenen kortikalen Gebieten lokalisiert sind. In neuerer Zeit wurden auch funktionell bildgebende Verfahren (PET und fMRT) eingesetzt, um die kortikalen Repräsentationsareale zu bestimmen. Vorteil dieser Methoden ist die Möglichkeit, die Hirnfunktionen gesunder Probanden mit einer sehr guten räumlichen Auflösung auch in tiefer gelegenen Strukturen untersuchen zu können. Mit der nichtinvasiven Methode fMRT können die Probanden auch wiederholt gemessen werden, die PET hingegen beruht auf dem Einsatz radioaktiv markierter Kontrastmittel und zählt damit zu den invasiven Verfahren. Eine Übersicht der Studien ist in Tabelle 1 dargestellt.

**Tabelle 1. Übersicht der funktionell bildgebenden Studien**

Studie	Methode und Aufgabe	N	untersuchte Gruppen/ Sprachen	Faktoren	Hauptergebnisse
(Perani et al., 96)	PET, passives Hören von Geschichten in L1, L2 und unbekannter Sprache	9	LALP homogen	Leistungs-niveau/ Erwerbsalter	größere Aktivierung von L1 im Vergleich zu L2, gleiche Aktivierungsmuster in L2 und unbekannter Sprache
(Yetkin et al., 96)	fMRT, Generierung von Wörtern in L1, L2 und L3	5	LA L2: HP L3: LP inhomogen	Leistungs-niveau/ Erwerbsalter	größte Aktivierungen in der Sprache mit dem niedrigsten Leistungsniveau
(Kim et al., 97)	fMRT, Satzproduktion in L1 und L2	6/6	EAHP, LAHP inhomogen	Erwerbsalter	gemeinsame Areale für L1 und L2 bei frühem Erwerb, links frontale Unterschiede bei spätem Erwerb
(Perani et al., 98)	PET, passives Hören von Geschichten in L1 und L2	12/ 9	EAHP, LAHP je homogen	Erwerbsalter	gleiche Aktivierungsmuster bei Probanden mit frühem und spätem Erwerb, Leistungsniveau wichtiger als Erwerbsalter für kortikale Repräsentation
(Chee et al., 99)	fMRT, Generierung von Wörtern in L1 und L2	15/ 9	EAHP LAHP homogen	Erwerbsalter	gleiche Aktivierungsmuster bei Probanden mit frühem und spätem Erwerb
(Chee et al., 01)	fMRT, semantische Zuordnungsaufgabe in L1 und L2	10/ 9	EAHP, LALP homogen	Leistungs-niveau/ Erwerbsalter	größte Aktivierungen in der Sprache mit dem niedrigsten Leistungsniveau
(Luke et al., 02)	fMRT, gram. und sem. Beurteilen von Sätzen	7	LALP, homogen	Leistungs-niveau/ Erwerbsalter	größte Aktivierungen in der Sprache mit dem niedrigsten Leistungsniveau
(Pallier et al., 03)	fMRT, Hören von Sätzen in L1, L2 und unbekannter Sprache	8/8	adoptierte Kinder, Muttersprachler, homogen	Erwerbsalter	adoptierte Kinder: gleiche Aktivierungsmuster der verlernten L1 und einer unbekannten Sprache; L2 ähnlich Muttersprachlern
hier vorliegend	fMRT, gram. und sem. Beurteilen von Sätzen	11/ 12/ 9	EAHP, LAHP, LALP, homogen	Leistungs-niveau und Erwerbsalter	Erwerbsalter hat Haupteffekt auf Repräsentation der Gram.; Leistungsniveau hat Haupteffekt auf Repräsentation der Sem.

L1 = Erstsprache; L2 = Zweitsprache; L3 = Drittsprache; EA = early acquisition = früher Zweitspracherwerb; LA = late acquisition = später Zweitspracherwerb; HP = high proficiency = hohes Sprachleistungsniveau; LP = low proficiency = niedriges Sprachleistungsniveau; N = Anzahl der Probanden pro Gruppe; EAHP = früher Zweitspracherwerb und hohes Sprachleistungsniveau; LAHP = später Zweitspracherwerb und hohes Sprachleistungsniveau; LALP = später Zweitspracherwerb und niedriges Sprachleistungsniveau; gram. = grammatikalisch; sem. = semantisch; inhomogen: Probanden mit unterschiedlichen Sprachkombinationen; homogen: gleiche Sprachen bei allen Probanden; Erwerbsalter = Alter beim Zweitspracherwerb; Leistungsniveau = sprachliche Leistung in L2; Leistungsniveau/Erwerbsalter = Konfundierung von Sprachleistungsniveau und Erwerbsalter

### 2.3.2.1 Einfluss des Sprachleistungsniveaus

In einer fMRT-Studie zur Wortflüssigkeit konnte der Einfluss des Sprachleistungsniveaus, also des Grades, wie gut eine Sprache beherrscht wird, gezeigt werden: Die höchsten frontalen und fronto-parietalen Aktivierungen treten bei Wortgenerierung in der Sprache auf, die den Probanden am wenigsten geläufig ist (Yetkin et al., 96). Dieser Zusammenhang zeigt sich auch, wenn Wörter einander nach semantischer Nähe zugeordnet werden müssen: Das niedrigste Sprachleistungsniveau geht mit der größten kortikalen Aktivierung einher (fMRT-Studie; (Chee et al., 01)). Auch bei grammatikalischen und semantischen Beurteilungsaufgaben zeigen Probanden mit spätem Zweitspracherwerb und niedrigem Leistungsniveau größere vornehmlich linkshemisphärische Aktivierungen bei der Verarbeitung der Zweitsprache (fMRT-Studie; (Luke et al., 02)).

Eine PET-Studie weist in eine andere Richtung: Bei Probanden mit spätem Zweitspracherwerb und niedrigem Sprachleistungsniveau führt das passive Hören der Erstsprache zu ausgedehnteren Aktivierungen als das Hören der Zweitsprache (Perani et al., 96).

Zusammenfassend wurden mit verschiedenen Methoden (PET, fMRT) und bei verschiedenen Aufgaben unterschiedliche Ergebnisse zum Effekt des Niveaus der Sprachleistung gefunden. Aus Untersuchungen zum generellen Einfluss des Schwierigkeitsgrades einer Aufgabe ist bekannt, dass zunehmende Schwierigkeit oder Komplexität einer Aufgabe mit zunehmender kortikaler Aktivierung einhergeht (Just et al., 96; Stromswold et al., 96; Caplan et al., 98; Caplan et al., 99; Carpenter et al., 99; Caplan et al., 00); (siehe auch 5.1).

Kritisch anzumerken ist, dass die bisherigen Studien zum Einfluss des Sprachleistungsniveaus dieses nicht isoliert, sondern immer unter dem konfundierenden Effekt des Alters beim Zweitspracherwerb untersucht haben. In allen genannten Studien wurde die gut beherrschte, früh erworbene Erstsprache mit der schlechter beherrschten, spät erworbenen Zweitsprache verglichen. Die Ergebnisse können also nicht eindeutig dem Sprachleistungsniveau zugeschrieben werden, sondern können auch vom Alter bei Zweitspracherwerb abhängen, dessen Einfluss im nächsten Abschnitt behandelt wird.



### 2.3.2.2 Einfluss des Spracherwerbsalters

Mittels fMRT konnte bei einer Satzgenerierungs-Aufgabe gezeigt werden, dass es bei Probanden, welche die Zweitsprache erst spät (Mittelwert  $[M] = 11,2$  Jahre) erlernt hatten, in den linkshemisphärischen frontalen Spracharealen (Broca-Region) räumlich separierte Aktivierungsgebiete von Erstsprache (L1) und Zweitsprache (L2) gibt (Kim et al., 97). Dies ist nicht der Fall bei Probanden, welche die Zweitsprache während der frühen Kindheit erlernt hatten. In beiden Gruppen gibt es keine unterschiedliche Aktivierung von L1 und L2 in den temporalen Spracharealen (Wernicke-Region).

Hingegen wurden in einer PET-Studie bei Probanden mit sehr hohem Sprachleistungsniveau keine Aktivierungsunterschiede zwischen passiver auditiver Sprachrezeption von L1 und L2 gefunden, unabhängig vom Alter bei Zweitspracherwerb ( $> 10$ . Lebensjahr vs. frühe Kindheit) (Perani et al., 98). Ein Vergleich mit ihrer früheren Studie (Perani et al., 96) lässt die Autoren schlussfolgern, dass das Niveau der Sprachleistung für die kortikale Repräsentation wichtiger ist als das Erwerbsalter, denn bei den gut geübten Probanden mit spätem Zweitspracherwerb finden sich bei L2 mehr aktive Areale als bei den Probanden mit geringerem Leistungsniveau und spätem Zweitspracherwerb.

Eine weitere fMRT-Studie spricht ebenfalls gegen den Einfluss des Erwerbsalters (Chee et al., 99): Es zeigen sich sehr ähnliche Aktivierungsmuster bei Probanden mit frühem ( $< 6$ . LJ) und spätem ( $> 12$ . LJ) Zweitspracherwerb und hohem Sprachleistungsniveau bei einer Aufgabe, in der Wortsilben vervollständigt werden. Die Lokalisation der maximal aktivierten Voxel der Erst- und Zweitsprache unterscheidet sich bei dieser Aufgabe bei keinem Probanden.

Pallier und Kollegen (Pallier et al., 03) untersuchten Probanden mit frühem Spracherwerb, welche diese aber wieder vergessen haben, da sie im frühen Kindesalter (zwischen dem 3. und 8. Lebensjahr) adoptiert wurden. Bei Rezeption von Sätzen zeigt sich kein Aktivierungsunterschied zwischen dieser „verlernten Erstsprache“ und einer weiteren komplett unbekannten Sprache. Bei Aufgaben in der im Adoptionsland erworbenen Zweitsprache zeigen sich ähnliche Aktivierungsmuster wie bei monolingual aufgewachsenen Probanden. Dies spricht für die Plastizität der Sprachareale bei früh veränderter Spracherfahrung, die Zweitsprache kann an Stelle der Erstsprache treten.

Eine kürzlich erschienene Studie hat mittels fMRT und ERP untersucht, wie zwei Sprachen in einem Hirn effektiv verarbeitet werden können, ohne einander zu stören. Bilinguale Probanden mit frühem Spracherwerb und sehr gutem Sprachleistungsniveau waren dazu angehalten, nur auf

eine der beiden Sprachen zu achten und Wörter der anderen Sprache zu ignorieren. Es gelang ihnen, die Nichtzielsprache schon auf einem sehr frühen sublexikalisch-phonologischen Verarbeitungsniveau herauszufiltern, d.h. sie haben die Bedeutung der Wörter nicht erfasst, um Interferenzeffekte zu vermeiden (Rodriguez-Fornells et al., 02). Dies spricht dafür, dass bei frühem und intensivem Spracherwerb eine sehr effektive, interferenzlose Verarbeitung beider Sprachen möglich ist. Es bleibt aber offen, welchen Effekt das Spracherwerbsalter auf diese Leistung hat.

Zusammengefasst unterscheiden sich auch die Studien zum Einfluss des Erwerbsalters in wesentlichen Punkten und kommen zu verschiedenen Ergebnissen: Kim und Kollegen (Kim et al., 97) untersuchten die aktive Sprachproduktion diverser Erst- und Zweitsprachen mit fMRT (intersubjektive Vergleiche). Ein Kritikpunkt an der Studie von Kim und Kollegen ist, dass nicht näher spezifiziert wird, wie das Sprachleistungsniveau bestimmt wurde. Außerdem wurden verschiedenste Sprachkombinationen untersucht, wohingegen Chee und Kollegen (Chee et al., 99) Probanden aus Singapur mit gesichert hohem Sprachniveau untersuchten. Demnach bleibt offen, ob das unterschiedliche Sprachleistungsniveau oder das Erwerbsalter für die Unterschiede in der neuronalen Repräsentation der Erst- und Zweitsprache in der Studie von Kim und Kollegen (Kim et al., 97) verantwortlich ist. Im Gegensatz zu diesen beiden Studien, in denen die Probanden aktive Generierungsaufgaben auszuführen hatten, untersuchten Perani und Kollegen (Perani et al., 98) und Pallier und Kollegen (Pallier et al., 03) die Sprachrezeption mit PET bzw. fMRT.

### 2.3.2.3 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der funktionell bildgebenden Untersuchungen weisen darauf hin, dass das Erwerbsalter und das Niveau der Sprachleistung die kortikale Repräsentation der Zweitsprache beeinflussen können. Während eine fMRT-Studie (Kim et al., 97) zeigt, dass die Aktivierungsmuster bei Satzgenerierung in L1 und L2 in frontalen Arealen vom Erwerbsalter abhängen, können andere bildgebende Studien diese Befunde nicht unterstützen (Perani et al., 98; Chee et al., 99). Neben dem Erwerbsalter scheint das Niveau der Sprachleistung einen Einfluss auf die Amplitude und die Größe der kortikalen Aktivierung von L2 zu haben (Yetkin et al., 96; Perani et al., 96; Perani et al., 98; Chee et al., 01; Luke et al., 02); (für eine Übersicht siehe (Abutalebi

et al., 01)). Diese Studien haben das Leistungsniveau allerdings nicht isoliert, sondern unter dem konfundierenden Effekt des Erwerbsalters untersucht.

Bisherige Studien haben zumeist nur das semantische System untersucht. Wie unter 2.1.1 beschrieben wurde, gibt es aber sowohl theoretisch als auch klinisch-experimentell begründete fundamentale Unterschiede zwischen Semantik und Grammatik, was sowohl ihren Erwerb als auch ihre kortikale Repräsentation und Verarbeitung angeht. Es ist bisher nicht geklärt, welchen differentiellen Einfluss das Spracherwerbsalter und das Sprachleistungsniveau auf die kortikale Repräsentation grammatikalischer und semantischer Verarbeitungsprozesse haben.

## 2.4 Fragestellung und Hypothesen

Aus den oben erwähnten Studien und Theorien geht hervor, dass als kritische Variablen beim Zweitspracherwerb insbesondere das Erwerbsalter und das Sprachleistungsniveau wirksam sind. Weiterhin weisen theoretische, klinische und experimentelle Studien sowohl auf Unterschiede der Repräsentation und Verarbeitung von Semantik und Grammatik an sich als auch auf einen differentiellen Effekt des Erwerbsalters auf die Grammatik hin. Bisherige Studien haben jedoch das grammatikalische System weitestgehend vernachlässigt.

Bisher ist also ungeklärt, wie sich die Faktoren Erwerbsalter und Leistungsniveau auf die kortikale Repräsentation semantischer und grammatikalischer Verarbeitungsprozesse auswirken.

### 2.4.1 Allgemeine Herangehensweise

Bilingualismus stellt ein etabliertes Modell zur Prüfung der Theorien des Spracherwerbs und der Sprachverarbeitung dar. Mit Hilfe dieses Modells kann untersucht werden, wie sich unterschiedliche Faktoren (z.B. Sprachleistungsniveau und Erwerbsalter) auf den Erwerb, die Repräsentation und die Verarbeitung der Sprache auswirken.

In der vorliegenden Studie soll untersucht werden, welche Faktoren die kortikale Repräsentation grammatikalischer und semantischer Verarbeitungsprozesse in der Zweitsprache beeinflussen und ob sich diese Faktoren in unterschiedlichem Maße auf die Repräsentation grammatikalischer und semantischer Verarbeitungsprozesse auswirken.

Die spezifischen Fragen der Studie können mit Hilfe der funktionellen Magnetresonanztomographie bei bilingualen Probanden untersucht werden. Mit dieser Methode sind Aussagen über die Lokalisation und Stärke der Hirnaktivierungen während grammatikalischer und semantischer Verarbeitungsprozesse möglich (siehe 3.1 im Methodenteil).

## 2.4.2 Spezifische Fragestellung

1. Hat das Sprachleistungsniveau einen differentiellen Einfluss auf die kortikale Repräsentation von grammatikalischen und semantischen Verarbeitungsprozessen in der Zweitsprache?
2. Hat das Erwerbsalter einen differentiellen Einfluss auf die kortikale Repräsentation von grammatikalischen und semantischen Verarbeitungsprozessen in der Zweitsprache?

## 2.4.3 Ziele und Hypothesen

### 2.4.3.1 Einfluss des Sprachleistungsniveaus

Das erste Ziel der Studie ist zu klären, welchen Einfluss das Sprachleistungsniveau auf die zerebrale Repräsentation grammatikalischer und semantischer Verarbeitungsprozesse hat.

Verschiedene bildgebende Studien zeigen kontroverse Ergebnisse, nach denen ein niedriges verglichen mit einem hohen Leistungsniveau mit erhöhter (Yetkin et al., 96; Chee et al., 01; Luke et al., 02) oder niedriger (Perani et al., 96) Hirnaktivierung einhergeht. Aufgaben höherer Komplexität und Schwierigkeit sind generell mit gesteigerter Aktivierung assoziiert (vgl. z.B. (Just et al., 96; Stromswold et al., 96)). Bisherige Studien haben den Effekt des Sprachleistungsniveaus nicht isoliert von dem des Erwerbsalters untersucht. Es gibt bisher keine Studien zu einem isolierten differentiellen Einfluss des Leistungsniveaus auf die kortikale Repräsentation semantischer und grammatischer Prozesse.

1. **Prüfhypothese:** Es gibt keinen Einfluss des Leistungsniveaus auf das zerebrale Aktivierungsmuster bei semantischen Urteilsprozessen in der Zweitsprache. Beim Vergleich des semantischen Urteilens zeigt sich kein Unterschied zwischen den Gruppen mit hohem Leistungsniveau und niedrigem Leistungsniveau (bei kontrolliertem

Erwerbsalter).

**Alternativhypothese:** Es gibt einen Einfluss des Leistungsniveaus auf das zerebrale Aktivierungsmuster bei semantischen Urteilsprozessen in der Zweitsprache. Beim Vergleich des semantischen Urteilens zeigt sich eine größere Aktivierung in der Gruppe mit niedrigem Leistungsniveau im Vergleich zur Gruppe mit hohem Leistungsniveau (bei kontrolliertem Erwerbsalter).

2. **Prüfhypothese:** Es gibt keinen Einfluss des Leistungsniveaus auf das zerebrale Aktivierungsmuster bei grammatikalischen Urteilsprozessen in der Zweitsprache. Beim Vergleich des grammatikalischen Urteilens zeigt sich kein Unterschied zwischen den Gruppen mit hohem Leistungsniveau und niedrigem Leistungsniveau (bei kontrolliertem Erwerbsalter).

**Alternativhypothese:** Es gibt einen Einfluss des Leistungsniveaus auf das zerebrale Aktivierungsmuster bei grammatikalischen Urteilsprozessen in der Zweitsprache. Beim Vergleich des grammatikalischen Urteilens zeigt sich eine größere Aktivierung in der Gruppe mit niedrigem Leistungsniveau im Vergleich zur Gruppe mit hohem Leistungsniveau (bei kontrolliertem Erwerbsalter).

#### 2.4.3.2 Einfluss des Spracherwerbsalters

Das zweite Ziel der Studie ist zu klären, welchen Einfluss das Erwerbsalter auf die zerebrale Repräsentation grammatikalischer und semantischer Verarbeitungsprozesse hat.

Verschiedene bildgebende Studien zeigen kontroverse Ergebnisse, nach denen es einen Effekt des Alters beim Zweitspracherwerb auf die Muster zerebraler Aktivierung gibt (Kim et al., 97) oder nicht (Perani et al., 98; Chee et al., 99). Eine ERP-Studie weist darauf hin, dass Semantik- und Grammatikerwerb unterschiedlichen kritischen Perioden unterliegen (Weber-Fox und Neville, 96). Wenn das der Fall ist, dann sollte das Erwerbsalter bei kontrolliertem Leistungsniveau einen unterschiedlichen Einfluss auf die kortikale Repräsentation semantischer und grammatikalischer Verarbeitungsprozesse haben.

1. **Prüfhypothese:** Es gibt keinen Einfluss des Erwerbsalters auf das zerebrale Aktivierungsmuster bei semantischen Urteilsprozessen in der Zweitsprache. Beim Vergleich des semantischen Urteilens zeigt sich kein Unterschied zwischen den Gruppen mit spätem Erwerbsalter und frühem Erwerbsalter (bei kontrolliertem Leistungsniveau).  
**Alternativhypothese:** Es gibt einen Einfluss des Erwerbsalters auf das zerebrale Aktivierungsmuster bei semantischen Urteilsprozessen in der Zweitsprache. Beim Vergleich des semantischen Urteilens zeigt sich eine größere Aktivierung in der Gruppe mit spätem Erwerbsalter im Vergleich zur Gruppe mit frühem Erwerbsalter (bei kontrolliertem Leistungsniveau).
  
2. **Prüfhypothese:** Es gibt keinen Einfluss des Erwerbsalters auf das zerebrale Aktivierungsmuster bei grammatikalischen Urteilsprozessen in der Zweitsprache. Beim Vergleich des grammatikalischen Urteilens zeigt sich kein Unterschied zwischen den Gruppen mit spätem Erwerbsalter und frühem Erwerbsalter (bei kontrolliertem Leistungsniveau).  
**Alternativhypothese:** Es gibt einen Einfluss des Erwerbsalters auf das zerebrale Aktivierungsmuster bei grammatikalischen Urteilsprozessen in der Zweitsprache. Beim Vergleich des grammatikalischen Urteilens zeigt sich eine größere Aktivierung in der Gruppe mit spätem Erwerbsalter im Vergleich zur Gruppe mit frühem Erwerbsalter (bei kontrolliertem Leistungsniveau).

### **3 Material und Methoden**

#### **3.1 Neurovaskuläre Kopplung und funktionelle Magnetresonanztomographie**

In den letzten Jahrzehnten kam es zu einer raschen Entwicklung nichtinvasiver funktioneller Messinstrumente. Mit elektrophysiologischen Methoden (EEG/ERP) wird eine sehr gute zeitliche Auflösung erreicht, da die Potentialänderungen der Nervenzellen direkt gemessen werden, die räumliche Auflösung ist aber eher gering. Metabolische/vaskuläre Meßmethoden (PET, fMRT) erreichen eine sehr gute räumlich-anatomische Auflösung, jedoch ist die zeitliche Auflösung nicht so gut. Der Grund dafür ist, dass die neuronale Aktivität, die im Millisekundenbereich stattfindet, nur indirekt über die Änderung metabolischer und/oder vaskulärer Parameter (bei fMRT: Änderung der Konzentration deoxygenierten Hämoglobins, die aus Änderungen von Blutfluss und Sauerstoffverbrauch resultieren) gemessen wird, welche mit Verzögerung im Sekundenbereich einsetzt. Der Zusammenhang zwischen neuronaler Aktivität und lokalen Änderungen der Hämodynamik wird als **neurovaskuläre Kopplung** bezeichnet.

Die fMRT ist ein noch relativ junges nichtinvasives Verfahren, um regionale funktionsabhängige hämodynamische Veränderungen im Gehirn nachzuweisen. Erste Arbeiten stammen aus den frühen neunziger Jahren (Belliveau et al., 91; Kwong et al., 92; Ogawa et al., 92), (Frahm et al., 92; Bandettini et al., 92; Menon et al., 92).

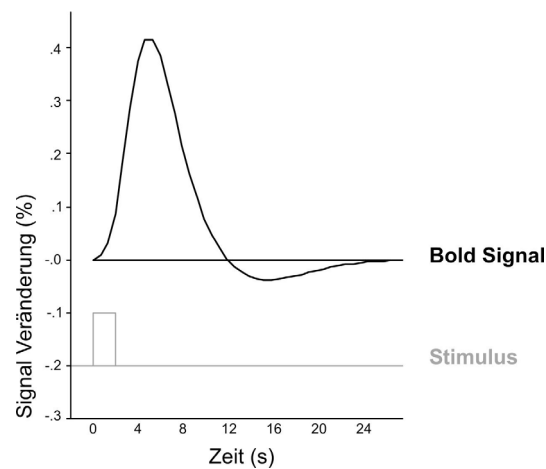
Physiologische Grundlage der fMRT ist eine Abfolge komplexer Vorgänge: Wenn die Aktivität eines Neuronenverbandes ansteigt, kommt es lokal u.a. zu einer Erhöhung des Blutflusses. Dadurch wird mehr Sauerstoff zu den Zellen transportiert, als verbraucht wird. Die Konzentration sauerstoffreichen Hämoglobins steigt an und die des deoxygenierten Hämoglobins fällt ab. Die funktionelle Magnetresonanztomographie nutzt die Tatsache, dass deoxygeniertes Hämoglobin paramagnetisch ist: Wenn seine Konzentration sinkt, verringert sich die paramagnetische Wirkung und es kommt zu einem stärkeren MR-Signal. Deoxygeniertes Hämoglobin ist also eine Art endogenes Kontrastmittel. Änderungen der Blutoxygenierung



können also indirekt über die durch das paramagnetische deoxygenierte Hämoglobin ausgelösten Änderungen des Magnetfeldes gemessen werden (blood oxygen level dependent [BOLD] signal; (Ogawa et al., 90; Kwong, 95)). Das BOLD-Signal hat einen charakteristischen Zeitverlauf, einem kurzen Stimulus folgt nach ca. 2 s ein relativ steiler Signalanstieg, der sein Maximum nach ca. 6 bis 8 s erreicht und dann langsam wieder abfällt (Boynton et al., 96), vergleiche Abbildung 2. Je größer die Feldstärke des externen Magnetfeldes im Magnetresonanztomographen (MRT), desto bessere, rauschärmere Signale können gemessen werden (Ugurbil et al., 99).

Bei funktionellen MRT-Messungen werden in der Regel zwei Zustände miteinander verglichen, z.B. das Bewegen eines Fingers im Vergleich zum Ruhezustand des Fingers. Die Bewegung des Fingers führt zu einer spezifischen lokalen Aktivierungszunahme im kontralateralen motorischen Areal. Der Aktivierungszustand bei Bewegung des Fingers wird mit dem des Ruhezustands verglichen.

Da die Probanden während der Untersuchung nicht nur dem Magnetfeld sondern auch der relativ starken Geräuscentwicklung der Gradientenspulen ausgesetzt sind und zudem -um motorische Artefakte zu verhindern- möglichst den Kopf nicht bewegen sollten, ist die zeitliche Dauer der Untersuchung begrenzt (die Dauer einer fMRT-Untersuchung liegt in der Regel zwischen 1 und 2 Stunden). Bedingt durch die Nichtinvasivität der Methode ist es aber möglich, Probanden mehrmals, zu verschiedenen Zeitpunkten, z.B. vor und nach Training/Therapie, zu untersuchen. Die Daten erlauben eine individuelle Auswertung, so dass intersubjektive Vergleiche möglich sind, die Bildung von Gruppenmittelwerten ist nicht zwingend notwendig (im Gegensatz zur PET).



**Abbildung 2.**

**Das BOLD-Signal. Dem Stimulus (beim Zeitpunkt Null) folgt nach 2 s ein steiler Anstieg, der nach seinem Maximum bei ca. 6-8 s nach dem Stimulus etwas langsamer wieder abfällt.**

Für eine ausführliche Beschreibung der Methode, der neurovaskulären Kopplung und der Grundlagen des BOLD-Signals möchte ich auf folgende Literatur verweisen:

(Cohen und Bookheimer, 94; Villringer und Dirnagl, 95; Dirnagl, 97; Villringer, 97; Raichle, 98; Moonen und Bandettini, 99; Logothetis et al., 01; Buxton, 02; Heeger und Ress, 02; Logothetis, 02; Shmuel et al., 02; Obrig und Villringer, 03; Ugurbil et al., 03).

## 3.2 Stichprobe

Untersucht wurden 32 italienisch-deutschsprachige Probanden, welche entsprechend ihres Erwerbsalters und Sprachleistungsniveaus in Deutsch in drei Gruppen eingeteilt wurden:

- EAHP (early acquisition, high proficiency): frühes Erwerbsalter (= 0), hohes Leistungsniveau, Anzahl der Probanden (N) = 11,
- LAHP (late acquisition, high proficiency): spätes Erwerbsalter (> 6), hohes Leistungsniveau, N = 12,
- LALP (late acquisition, low proficiency): spätes Erwerbsalter (> 6), niedriges Leistungsniveau, N = 9.

Die Gruppeneinteilung und die Verteilung der Geschlechter in den drei Gruppen ist in Tabelle 2 dargestellt. Über den Vergleich der Gruppen EAHP und LAHP kann der Effekt des Alters beim Zweitspracherwerb bestimmt werden (Tabelle 3). Den Einfluss des Leistungsniveaus kann bestimmt werden, indem die Gruppen LAHP und LALP miteinander verglichen werden (Tabelle 4).

**Tabelle 2. Probanden**

Gruppe	EAHP	LAHP	LALP
Erwerbsalter	früh (seit Geburt)	spät (> 6. LJ)	spät (> 6.LJ)
Leistungsniveau	hoch	hoch	niedrig
Anzahl der Probanden	11	12	9
Geschlecht männlich/weiblich	5/6	4/8	7/2

Erwerbsalter = Alter beim Zweitspracherwerb; EAHP = früher Zweitspracherwerb und hohes Leistungsniveau; LAHP = später Zweitspracherwerb und hohes Leistungsniveau; LALP = später Zweitspracherwerb und niedriges Leistungsniveau; LJ = Lebensjahr

**Tabelle 3. Effekt des Alters beim Zweitspracherwerb**

Gruppe	EAHP	LAHP	LALP
Erwerbsalter	früh (seit Geburt)	spät (> 6. LJ)	spät (> 6.LJ)
Leistungsniveau	hoch	hoch	niedrig

Um den Effekt des Erwerbsalters zu bestimmen, werden die beiden Gruppen mit hohem Leistungsniveau aber unterschiedlichem Erwerbsalter miteinander verglichen. Erwerbsalter = Alter beim Zweitspracherwerb; EAHP = früher Zweitspracherwerb und hohes Leistungsniveau; LAHP = später Zweitspracherwerb und hohes Leistungsniveau; LALP = später Zweitspracherwerb und niedriges Leistungsniveau; LJ = Lebensjahr

**Tabelle 4. Effekt des Leistungsniveaus**

Gruppe	EAHP	LAHP	LALP
Erwerbsalter	früh (seit Geburt)	spät (> 6. LJ)	spät (> 6.LJ)
Leistungsniveau	hoch	hoch	niedrig

Um den Effekt des Leistungsniveaus zu bestimmen, werden die beiden Gruppen mit spätem Zweitspracherwerb aber unterschiedlichem Leistungsniveau miteinander verglichen. Erwerbsalter = Alter beim Zweitspracherwerb; EAHP = früher Zweitspracherwerb und hohes Leistungsniveau; LAHP = später Zweitspracherwerb und hohes Leistungsniveau; LALP = später Zweitspracherwerb und niedriges Leistungsniveau; LJ = Lebensjahr

Alle Probanden waren gesunde Rechtshänder, die nicht mit dem Stimulusmaterial vertraut waren. Sie lebten zum Zeitpunkt der Untersuchung in Deutschland. Alle Probanden waren Studenten oder hatten ein Studium abgeschlossen und hatten somit ein vergleichbares Bildungsniveau. Eine Zusammenfassung der demographischen und anamnestischen Daten ist unter 3.6 in Tabelle 6 dargestellt.

Obwohl die Probanden in der EAHP-Gruppe seit ihrer Geburt beiden Sprachen ausgesetzt waren, wird Italienisch für alle Probanden als L1 und Deutsch als L2 bezeichnet, da 7 der 11 Probanden in dieser Gruppe ihre ersten Lebensjahre in Italien verbrachten und bei 5 Probanden beide Eltern Italiener waren (die übrigen Probanden hatten eine deutsche Mutter und einen italienischen

Vater). In den ersten sechs Lebensjahren waren sie zu 55% mit der italienischen und zu 45% mit der deutschen Sprache konfrontiert.

### 3.3 Versuchsplan

Da die Gruppenzugehörigkeit der Probanden festgelegt war und nicht zufällig bestimmt oder zugeordnet werden konnte, handelt es sich um ein „quasiexperimentelles“ Design.

Die Probanden stimmten nach mündlicher und schriftlicher Aufklärung schriftlich der Untersuchung zu und wurden für ihre Teilnahme am Experiment bezahlt. Die Studie entspricht den Richtlinien der Ethikkommission der Charité Berlin und ist durch diese genehmigt (Vorgang vom 03.04.2000). Ausschlusskriterien waren psychiatrische, neurologische oder kardiologische Vorerkrankungen, Operationen an Kopf, Herz oder Augen, Metallsplitter oder Metallprothesen, Gefäß-Clips, bestehende oder mögliche Schwangerschaft, schwere Allergien und Klaustrophobie.

Nach ihrer Einwilligung wurden die Probanden standardisiert mündlich instruiert (Instruktion siehe Anhang S. 93) und absolvierten einen kurzen Probedurchgang, um sich mit der Aufgabe und der Art des Stimulationsmaterials bekannt zu machen. Keiner der Probanden hatte Schwierigkeiten, die Aufgabe zu verstehen. Nach der fMRT-Untersuchung wurde der sprachliche und demographische Hintergrund der Probanden erhoben. Der Versuchsplan ist in Tabelle 5 dargestellt.

**Tabelle 5. Versuchsplan**

Schritte		
Probandenrekrutierung	per Aushang	
Aufklärung der Probanden	Dokumentierte Patientenaufklärung über die MRT-Untersuchung gemäß	
Einwilligung der Probanden	Ethik-Kommission ( <a href="http://www.procompliance.de">http://www.procompliance.de</a> )	
Instruierung der Probanden	Vorlesen der Instruktion und Erläuterung der Aufgabe (siehe Anhang S. 93)	
Kurzer Probedurchgang	Testdurchgang mit 8 Probesätzen am Computer außerhalb des MRT, evtl. Erläuterungen zur Aufgabe	
fMRT-Untersuchung (siehe 3.4.1.3)	Lokalisierung in 3 Ebenen	ca. 2 min
	anatomische 3-D-Aufnahme	ca. 12 min
	funktionelle 2-D-Aufnahme	ca. 32 min
Erhebung demographisch-anamnestischer Daten, des sprachlichen Hintergrunds und Leistungsniveaus (siehe 3.4)	Fragebögen zu demographisch-anamnestischen Daten und Sprachhintergrund (siehe Anhang S. 91-92 und 3.4.3)	
	Sprachtests zum Leistungsniveau (siehe 3.4.3)	
	Prüfung der Sprachleistung durch Muttersprachler (siehe 3.4.3)	
	Erhebung der Verhaltensdaten (siehe 3.4.1.1 und 3.4.3)	

## 3.4 Variablencharakteristik

### 3.4.1 Abhängige Variablen

#### 3.4.1.1 Stimulusmaterial

Das Stimulusmaterial bestand aus 180 kurzen Sätzen (90 deutsche Sätze und 90 italienische Sätze). 44 der deutschen und italienischen Sätze waren semantisch und grammatikalisch korrekt. Die restlichen 46 Sätze beider Sprachen enthielten entweder semantische (23 Sätze) oder grammatikalische (23 Sätze) Anomalien oder Fehler. Somit ergaben sich 4 Konditionen: Semantisches Urteilen Deutsch, semantisches Urteilen Italienisch, grammatikalisches Urteilen Deutsch und grammatikalisches Urteilen Italienisch.

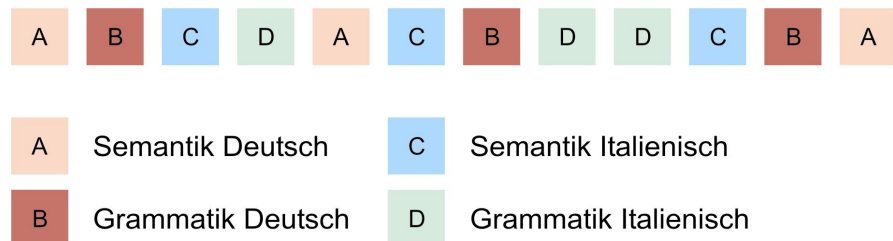
Die Stimuluskonstruktion wurde angelehnt an Hahne und Friederici (Hahne und Friederici, 02). Alle Sätze wurden von je fünf Muttersprachlern hinsichtlich ihrer semantischen und grammatikalischen Korrektheit bzw. Inkorrektheit beurteilt. Es wurden nur Sätze in das Stimulusmaterial übernommen, bei denen es eine 100-prozentige Übereinstimmung zwischen den Ratern gab, wonach ein Satz eindeutig semantisch oder grammatikalisch richtig oder falsch war. Alle verwendeten Sätze waren orthographisch korrekt, entsprachen sich in der Länge (im Mittel 6,4 Wörter) und enthielten Wörter mit hoher Wortfrequenz.

In der Kondition mit semantischen Abweichungen waren die Sätze grammatikalisch korrekt aber enthielten semantische Fehler, z.B. „Das Reh erschießt den Jäger.“; „Die Maus jagt die Katzen.“; „La pannocchia mangia il maiale.“ („*Der Maiskolben isst das Schwein.*“).

In der Kondition mit grammatikalischen Abweichungen waren die Sätze semantisch korrekt und bedeutungsvoll aber enthielten verschiedene Arten grammatikalischer Fehler, wie Fehler in Zahl, Geschlecht oder Fall, die im Italienischen und Deutschen offen markiert sind über den Artikel, das Substantiv oder das Adjektiv. Satzbeispiele: „Der Hund laufen über die Wiese.“; „Das Kalender hängt an der Wand.“; „I gatti [Plural] ama [Singular] cacciare i topi.“ („*Die Katzen jagt gerne die Maus.*“).

### 3.4.1.2 Aufgabe

Die Sätze wurden visuell für je 4 s präsentiert. Das Experiment bestand aus insgesamt 12 randomisierten Blöcken, das entspricht 3 Blöcken pro Kondition (Abbildung 3). Zwischen den Blöcken wurde für 32 s ein Fixationskreuz präsentiert. Jeder Block wurde eingeleitet durch eine Instruktion, z.B. „Grammatikalisches Urteilen Deutsch“ und es folgten 15 pseudo-randomisierte korrekte und inkorrekte Sätze der jeweiligen Kondition. Nach der Präsentation des Satzes für 4 s wurde für weitere 4 s ein Fixationskreuz präsentiert während dessen die Probanden über das Drücken einer Taste mit der rechten Hand angaben, dass sie einen korrekten Satz identifiziert hatten.



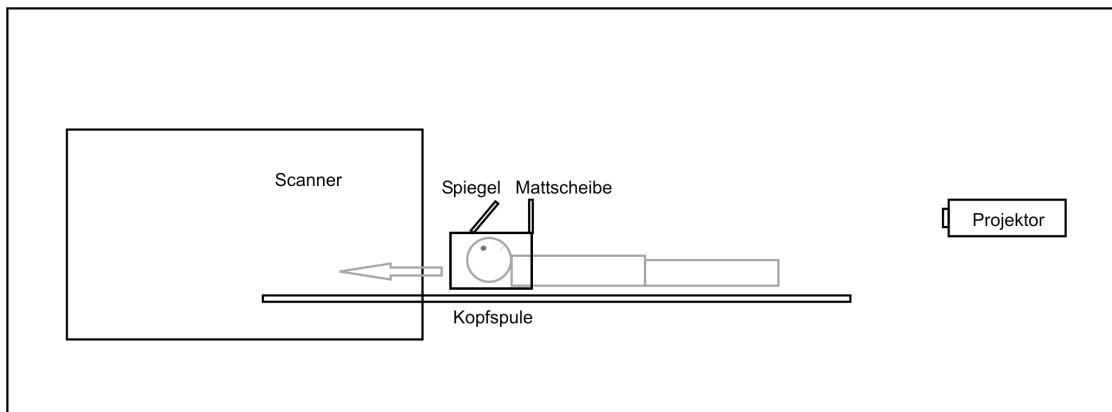
**Abbildung 3.**

**Die Abfolge der Stimuli. Die vier Konditionen wurden in je drei Blöcken repräsentiert, die durch Ruhephasen (Fixationskreuz) voneinander getrennt waren.**



### 3.4.1.3 FMRT Messung

Ein Spiegel, der an der Kopfspule befestigt war, ermöglichte den Probanden in Rückenlage ein einfaches Lesen der Sätze (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5).



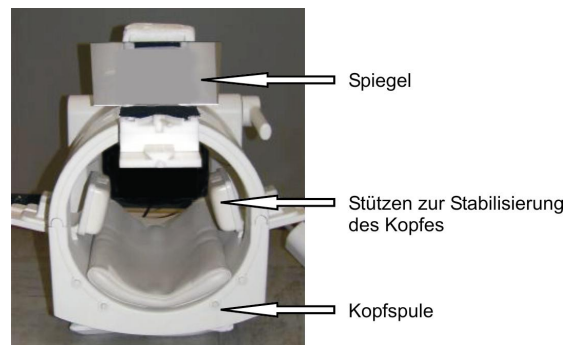
**Abbildung 4.**

**Der Aufbau. Über den Projektor wurden die Stimuli auf die Mattscheibe projiziert, die der Proband mit Hilfe des Spiegels sehen konnte.**

Der in der vorliegenden Untersuchung verwendete Scanner hatte eine Magnetfeldstärke von 1,5 Tesla (Magnetom Vision, Siemens, Erlangen, Deutschland). Der Kopf des Probanden lag in einer „Birdcage“ Kopfspule (circularly polarized head coil, siehe Abbildung 5). Kopfbewegungen wurden mittels eines Vakuumkissens minimiert, welches die Kopflege über die gesamte Messzeit hinweg stabilisierte. Nach einer ersten lokalisierenden Messung in drei Ebenen (Scout) folgten eine hochaufgelöste anatomische Messung und die funktionelle Messung mit folgenden Parametern:

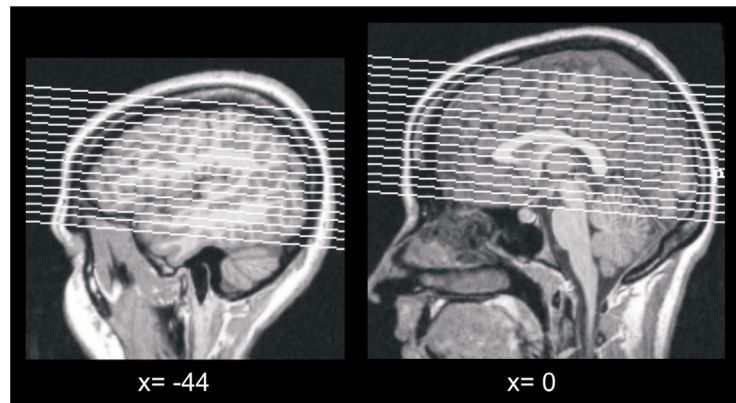
- T1-gewichtete 3-dimensionale anatomische Messung (MPRage): TR 9,7 ms; TE 4,0 ms; FA 12°; FOV 256 mm; Matrix 256 x 256; Voxelgröße 1 mm<sup>3</sup>, 170 bis 180 Schichten von 1 mm Dicke
- T2\*-gewichtete 2-dimensionale funktionelle Messung (Gradient-Echo EPI): TR 2000 ms; TE 60 ms; FA 90°; FOV 256 mm; Matrix 64 x 64; 16 Schichten von 5 mm Dicke; Interslice Gap

0,5 mm; in-plane Auflösung 4 mm<sup>2</sup>; aufsteigende Akquisition der Bilder; 960 Volumina, annähernd parallel zur anterioren und posterioren Kommissur (ACPC-Linie)



**Abbildung 5.**  
**Die Kopfspule. Über die Spiegelvorrichtung konnten die**  
**Probanden die Stimuli sehen.**

Mit der 2-dimensionalen funktionellen Aufnahme wurde das gesamte Gehirn mit Ausnahme der am meisten inferioren Teile des anterioren Temporallappens (inferiores  $z \approx -24$ ), des Kleinhirns und der am meisten superioren Teile des Frontal- und Temporallappens (superiores  $z \approx 50$ ) gemessen (Abbildung 6). In Arealen, in denen sich Luft in unmittelbarer Nachbarschaft befindet (wie es z.B. in der Nähe der Stirnhöhle oder der Mittelohrbereiche der Fall ist), kommt es durch die Störung der Magnetfeldhomogenität zu Signalverminderungen (sogenannten Suszeptibilitätsartefakten). Diese Signalauslöschungen betreffen orbitofrontale und inferior temporale Areale, bisherige Untersuchungen weisen diesen Arealen allerdings auch keine sprachspezifische Rolle zu.



**Abbildung 6.**

**Die Schichtführung.** Ansicht der Lage der 16 Schichten in der linken Hemisphäre ( $x = -44$ ) und auf der Mittellinie ( $x = 0$ ). Die am meisten inferioren Teile des anterioren Temporallappens, das Kleinhirn und der am weitesten superiore Teil des Frontal- und Parietallappens wurden nicht erfasst.

### 3.4.2 Unabhängige Variablen

Unabhängige Variablen waren:

- Das Erwerbsalter, welches in den Vergleich der Gruppen einging (frühes Erwerbsalter  $N = 11$ ; spätes Erwerbsalter  $N = 21$ ). Das Zuordnungskriterium war der Zeitpunkt des Lernens der Zweitsprache von Geburt an oder nach dem 6. Lebensjahr. → Faktor Erwerbsalter (früh/spät) ( $N 11/21$ )
- Das Sprachleistungsniveau in der Zweitsprache, welches beim Vergleich der Gruppen einging (hohes Leistungsniveau  $N = 23$ , niedriges Leistungsniveau  $N = 9$ ). Das Leistungsniveau wurde durch verschiedene Sprachtests, die Verhaltensdaten sowie die Beurteilung durch einen Muttersprachler bestimmt. → Faktor Leistungsniveau (hoch/niedrig) ( $N 23/9$ ).
- Die Sprache. Das Stimulusmaterial bestand aus 90 italienischen (L1) und 90 deutschen (L2) Sätzen. → Faktor Sprache (L1/L2)

### 3.4.3 **Kontrollvariablen**

Als Kontrollvariablen zur Überprüfung der Parallelität der jeweiligen Gruppen und zur Zuordnung der Probanden in eine der drei Gruppen wurden folgende Variablen erhoben (Fragebogen siehe Anhang):

- Händigkeit
- Geschlecht
- Bildungsniveau
- Alter
- Dauer des Umgangs mit L2 (in Jahren): Die Zeitspanne, in welcher ein Umgang mit L2 stattfand, entspricht der Differenz von Alter und Erwerbsalter
- Prozentueller Anteil des Umgangs mit L1 und L2, in den Altersbereichen von 0-6, 7-14, 15-18 und 18 Jahren bis zum Zeitpunkt der Untersuchung
- Aktueller Anteil des Umgangs mit L1 und L2 in verschiedenen Lebensbereichen (Familie, Freunde, Partner/Partnerin, Arbeit, Kollegen, Freizeit, TV/Radio und Lesen), Rangskala von 1 (nur Italienisch) bis 7 (nur Deutsch)
- Erwerbsalter (in Jahren): Entspricht dem Alter, ab welchem die Zweitsprache gelernt wurde
- Sprachleistungsniveau in L1 und L2 (in Punkten): Erhoben nach der fMRT-Untersuchung. Es wurde einerseits ein kurzer Sprachtest in L1 und L2 durchgeführt, der das Lesen eines kurzen Zeitungsartikels und die schriftliche Beantwortung von 5 Fragen zu dem Text beinhaltete (Zeitungstest). Für jede richtige Antwort wurden zwei Punkte vergeben. Für nur teilweise richtige oder unvollständige Antworten bekam der Proband einen Punkt. Bei falschen oder fehlenden Antworten wurde kein Punkt vergeben. Es ergab sich somit eine maximale Punktzahl von 10 Punkten in beiden Sprachen. Weiterhin wurden die Probanden mit einem ausführlichen anerkannten Sprachtest in L2 untersucht (Prüfungen Deutsch als Fremdsprache, 98). Dieser Sprachtest wird in verschiedenen nationalen und internationalen Sprachschulen und Sprachinstituten zur Beurteilung der deutschen Sprachkompetenz angewendet. Er enthält 90 Items und besteht aus einem grammatikalischen und einen semantischen Teil. Der Test wurde schriftlich von den Probanden bearbeitet und nach dem

vorgegebenen Schema von einem deutschsprachigen Muttersprachler ausgewertet. Die Bearbeitung des Tests dauert ca. 1,5 Stunden. 16 Probanden absolvierten den Sprachtest unmittelbar nach der fMRT-Untersuchung und 8 Probanden ca. 12 Monate danach. 8 Probanden standen nicht für die Untersuchung mit diesem ausführlichen Test zur Verfügung. Außerdem wurde die Sprachproduktion und das Sprachverständnis in L2 von einem Muttersprachler während des gesamten Kontaktes mit dem Probanden (vom telefonischen Erstkontakt bis zum Ende der Untersuchung) beurteilt.

- Verhaltensleistung in L1 und L2: Innerhalb des Scanners wurden online die Reaktionen der Probanden erhoben. Die Probanden hatten bei Erscheinen des Fixationskreuzes zu reagieren (nach 4 s Stimuluspräsentation), um motorische Aktivierungen zu kontrollieren. Deswegen konnte innerhalb des Scanners nur die Genauigkeit der Reaktionen beurteilt werden. Nach der Untersuchung wurde die Rate der richtig positiven Antworten an den möglich richtigen Antworten berechnet (Prozent korrekter Antworten). Zusätzlich wurden 24 Probanden unmittelbar oder 12 Monate nach der fMRT-Untersuchung erneut mit dem Stimulusmaterial konfrontiert und sie sollten die Sätze so schnell und genau wie möglich hinsichtlich ihrer Korrektheit per Mausklick mit der rechten Hand beurteilen. Somit wurden die Reaktionszeit und erneut die Genauigkeit der Reaktionen auf das gesamte Stimulusmaterial erhoben.

## 3.5 Datenanalyse allgemein

### 3.5.1 Analyse der demographisch-anamnestischen Daten und der Verhaltensdaten

Die demographisch-anamnestischen Daten und Verhaltensdaten (Genauigkeit, Reaktionszeiten, Punktzahl in den Sprachtests in L1 und L2) wurden mit dem Statistik-Programm SPSS ausgewertet (SPSS für Windows, Version 10,0 der SPSS-Corporation; <http://www.spss.com/>).

#### Parallelitätsprüfung

Bei der Prüfung der Parallelität der Gruppen kamen entsprechend des Datenniveaus nichtparametrische Verfahren zum Einsatz (Mann-Whitney-Test [U-Test] und Wilcoxon-Test [Z-Test] bei ordinal skalierten Daten,  $\chi^2$ -Test [Phi-Koeffizient] bei nominal skalierten Daten). Sie sind in den Tabellen entsprechend gekennzeichnet.

#### Voraussetzungsprüfung

Auf Grund der geringen Anzahl an Versuchspersonen kamen für die Analyse der demographisch-anamnestischen Daten und Verhaltensdaten nichtparametrische Verfahren zum Einsatz, welche robust sind gegen Verletzungen der Normalverteilung und Varianzhomogenität.

#### Signifikanztests

Signifikanztests wurden zweiseitig vorgenommen. Ausgehend von einer Irrtumswahrscheinlichkeit ( $\alpha$ ) von 5% wurde auf Grund multipler Vergleiche ( $m$ ) die folgende Bonferroni-Korrektur ( $\alpha/m$ ) durchgeführt:

- Um die Unabhängigkeit der Variablen zur Parallelitätsprüfung der Gruppen (siehe 3.4.3) zu bestimmen, wurde eine Faktorenanalyse durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass mehr als 90% der Varianz durch 5 Faktoren erklärt werden. Die Bonferroni-Korrektur ( $\alpha/m$ ) erfolgte dementsprechend mit  $m = 5$ ; ( $0,05 / 5 = 0,01$ ). Das korrigierte  $\alpha$  beträgt 0,01 bei der Prüfung der Parallelität der drei Gruppen.
- Um die Unabhängigkeit des Stimulationsmaterials (Sätze der 4 Bedingungen, siehe 3.4.1.1) zu überprüfen, wurde eine Faktorenanalyse durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass in allen Bedingungen mehr als 90% der Varianz durch 3 Faktoren erklärt werden. Die Bonferroni-

Korrektur ( $\alpha/m$ ) erfolgte dementsprechend mit  $m = 3$ ; ( $0,05 / 3 = 0,016$ ). Das korrigierte  $\alpha$  beträgt 0,016 bei der Prüfung der Verhaltensunterschiede der drei Gruppen.

- Beim Vergleich der Sprachen innerhalb der Gruppen (Sprachleistungsniveau und Verhaltensdaten) wurde ein  $\alpha$  von 0,05 zugrundegelegt.

### **3.5.2 Analyse der funktionell bildgebenden Daten**

Die funktionellen Daten wurden mit dem Softwarepaket „Statistical Parametric Mapping“ ausgewertet (SPM99; Wellcome Department of Cognitive Neurology, University College London, UK; <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>). Die ersten 15 funktionellen Volumina (Scans) wurden von der Datenauswertung ausgeschlossen um eine vollständige Magnetfeldsättigung voraussetzen zu können. Mit Hilfe allgemein anerkannter SPM99 Methoden wurde die zeitlichen Verschiebung der Anregung der 1. bis zur 16. Schicht herausgerechnet (engl. slice-time correction). Danach wurden die Daten „bewegungskorrigiert“, normalisiert und räumlich geglättet mit einem gaußschen Kernel (FWHM =  $6 \times 6 \times 8,25$  mm) (Friston et al., 95). Zudem wurden Tiefpass- (Gauß Filter von 4 s) und Hochpass- (308 s) Frequenzfilter angewendet.

Die Daten lagen nach dieser Vorverarbeitung somit im 4-dimensionalen Raum vor, wobei sich 3 Dimensionen auf den Raum in x-y-z-Richtung (vergleiche Abbildung 7) beziehen und die vierte Dimension der Zeit entspricht. Als Referenzfunktion für die Zeitverläufe diente eine „Boxcar-Funktion“ entsprechend des experimentellen Protokolls welche entsprechend der hämodynamischen Antwortfunktion modelliert ist, um die verzögert einsetzende hämodynamische Veränderung und deren spezifische Form abzubilden (Boynton et al., 96) (vergleiche auch 3.1).

Um den Effekt residualer Bewegung weitestgehend zu reduzieren, wurden die 6 Bewegungsparameter (Bewegung und Rotation in den 3 Raumrichtungen bzw. Raumebenen) für jeden einzelnen Probanden in das Modell als Parameter mit einbezogen. Für jeden Probanden wurden sogenannte Kontrast-Bilder berechnet, und zwar für jede Kondition einzeln und für die entsprechenden Unterschiede zwischen den Konditionen (d.h. die Kondition semantisches Urteilen in L2 wurde verglichen mit der Kondition semantisches Urteilen in L1; die Kondition grammatikalisches Urteilen in L2 wurde verglichen mit der Kondition grammatikalisches Urteilen in L1). Diese Kontrast-Bilder enthalten somit für jeden Probanden die statistische Information (Parameterschätzer), in welchen Arealen sich eine Kondition signifikant von der

Ruhebedingung zwischen den Blöcken unterscheidet bzw. in welchen Arealen sich zwei Konditionen signifikant voneinander unterscheiden. Gruppeneffekte wurden als eine Analyse auf zweiter Ebene mit diesen Kontrast-Bildern berechnet. Diese „Statistik mit der Statistik“ (d.h., die Statistik mit den statistischen Kontrast-Bildern) wird bei Analyse funktionell bildgebender Daten eingesetzt, um die Ergebnisse von den untersuchten Probanden unabhängig zu machen und um auf die gesamte Population verallgemeinern zu können (Holmes und Friston, 98; Friston et al., 99). Die Probanden gehen als zufälliger Faktor in die Analyse mit ein (man spricht von einer „random“ oder „mixed effects analysis“). Daher können die funktionellen Aktivierungen einzelner Probanden (z.B. auch Artefakte) das Ergebnis der Gruppenanalyse nicht so stark beeinflussen oder verfälschen wie bei Analyse auf erster Ebene, in der die Varianz der Probanden nicht als zufälliger Faktor in die Analyse einbezogen wird (sogenannte „fixed effects analysis“). Die Ergebnisse einer Analyse auf erster Ebene sind demzufolge immer nur für genau die Probanden gültig, die tatsächlich untersucht wurden und eine Generalisierung auf die Population ist grundsätzlich nicht zulässig.

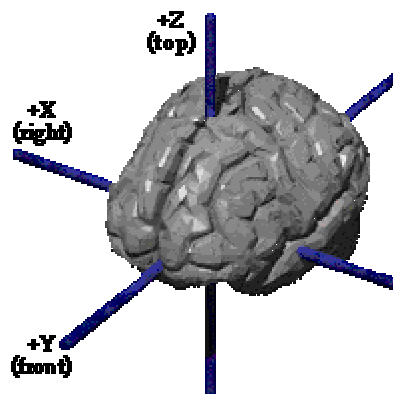
Für Vergleiche *innerhalb der Gruppen* wurden mit den entsprechenden Kontrast-Bildern t Tests bei einer Stichprobe („one-sample-t-tests“) separat für jede Gruppe durchgeführt, um die Regionen zu extrahieren, die innerhalb der Gruppe eine größere Aktivierung der Zweitsprache im Vergleich zur Erstsprache zeigen. Die Erstsprache fungiert somit als „Baseline“ bei den Vergleichen innerhalb der Gruppen. Als statistische Schwelle wurde, wie allgemein üblich, ein unkorrigierter p-Wert von 0,005 bei einer minimalen Aktivierungsgröße von 10 Voxeln zugrunde gelegt.

Bei Vergleichen *zwischen den Gruppen* wurden mit den entsprechenden Kontrast-Bildern t Tests bei unabhängigen Stichproben („two-sample-t-tests“) durchgeführt, um die Areale zu extrahieren, die eine signifikant größere Aktivierung in der einen als in der anderen Gruppe zeigen. Als statistische Schwelle wurde ein unkorrigierter p-Wert von 0,005 bei einer minimalen Aktivierungsgröße von 10 Voxeln zugrunde gelegt. So wurden die Gruppen EAHP und LAHP (Effekt des Erwerbsalters) und die Gruppen LAHP und LALP (Effekt des Sprachleistungsniveaus) miteinander in jeder Kondition verglichen.

Aktivierte Areale werden üblicherweise in einem 3-dimensionalen Koordinatensystem dargestellt. Dieses Koordinaten-System entspricht entweder dem Talairach-Raum oder dem daran angelehnten System des Montreal Neurological Institute (MNI, <http://www.mrc-cbu.cam.ac.uk/Imaging/>). Der Talairach-Atlas wurde von Talairach und Tournoux anhand der genauen Vermessung eines Gehirns erstellt (Talairach und Tournoux, 88). Das „Standardhirn“



des MNI-Systems entstand aus der Überlagerung von 152 Einzelhirnen. Dieses sogenannte „Template“ ist das „Standardhirn“ von SPM99. Beide, der Talairach- und der MNI-Raum, sind ineinander transformierbar (<http://www.mrc-cbu.cam.ac.uk/Imaging/>) und werden von fast allen bildgebenden Untersuchungen als Referenz verwendet. Sie dienen somit der Vergleichbarkeit der Lokalisation der Aktivierungen zwischen verschiedenen Probanden und Studien. Der Nullpunkt ( $x = 0$ ,  $y = 0$ ,  $z = 0$ ) liegt auf der anterioren Kommissur (AC) über welche die beiden Hemisphären miteinander verbunden sind. Die x-Richtung entspricht der horizontalen Ausrichtung von der linken (-) zur rechten (+) Seite des Gehirns, die y-Richtung ist die horizontale Ausrichtung von vorne (anterior) (+) nach hinten (posterior) (-) und die z-Richtung entspricht der vertikalen Ausrichtung von oben (superior) (+) nach unten (inferior) (-). Das Koordinatensystem ist schematisch in Abbildung 7 dargestellt.



**Abbildung 7.**  
**Das Koordinatensystem. Schematische Darstellung des dreidimensionalen Koordinatensystems (entnommen aus <http://ric.uthscsa.edu/projects/talairachdaemon.html>)**

## 3.6 Prüfung der Parallelität der Stichproben

Die Beschreibung der Variablen findet sich unter 3.4.3. Sämtliche Mittelwerte, Standardabweichungen und Statistiken sind in Tabelle 6 angegeben.

### 3.6.1 Demographisch-anamnestische Daten

Die drei Gruppen unterschieden sich nicht hinsichtlich der Verteilung des Alters, Geschlechts und Bildungsniveaus.

### 3.6.2 Sprachhintergrund

Die Vergleiche von Leistungsniveau in L1, Sprachhintergrund in L1 und Verhaltensleistung in L1 zeigten keinen Unterschied zwischen den Gruppen. Die drei Gruppen unterschieden sich auch nicht im Ausmaß, mit dem sie insgesamt aktuell mit L1 und L2 umgingen.

Hinsichtlich des Sprachhintergrunds in L2 unterschieden sich die entsprechenden Gruppen erwartungsgemäß:

Vergleich der Gruppen in L1 und L2

- Es gab einen signifikanten Unterschied zwischen der **EAHP- und LAHP-**Gruppe im Erwerbsalter, der Gesamtdauer des Umgangs mit L2, dem mittleren prozentuellen Umgang mit L1 und L2 in den ersten 18 Lebensjahren und dem aktuellen Gebrauch der Zweitsprache innerhalb der Familie.
- Es gab einen signifikanten Unterschied zwischen der **EAHP- und LALP-**Gruppe im Erwerbsalter, der Gesamtdauer des Umgangs mit L2, dem mittleren prozentuellen Umgang mit L1 und L2 in den ersten 18 Lebensjahren und dem aktuellen Gebrauch von L2 innerhalb der Familie. Die LALP-Gruppe lebte eine signifikant kürzere Zeit in Deutschland als die EAHP-Gruppe.

- Es gab einen signifikanten Unterschied zwischen der **LAHP- und LALP-**Gruppe im aktuellen Gebrauch von L2 mit dem/der Partner/Partnerin. Die LALP-Gruppe lebte eine signifikant kürzere Zeit in Deutschland als die LAHP-Gruppe.

In allen anderen demographisch-anamnestischen Variablen ergab sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen.

Die Ergebnisse der Parallelitätsprüfung des Sprachleistungsniveaus (Leistung in den Sprachtests, Reaktionszeiten und Genauigkeit der Reaktionen auf das Stimulusmaterial während und nach der fMRT-Untersuchung) sind aus Gründen der Übersichtlichkeit im Ergebnisteil unter 4.1 dargestellt.

**Tabelle 6. Parallelitätsprüfung der Gruppen in demographischen und anamnestischen Daten**

		EAHP	LAHP	LALP	signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen
N		11	12	9	
Geschlecht	weiblich	6	8	2	-
	männlich	5	4	7	
Alter (M, SD)		26,9 (6) (N=11)	29,2 (7,5) (N=12)	25,2 (1,9) (N=9)	-
Erwerbsalter in L2 (M, SD)		0 (0) (N=11)	18,9 (6,6) (N=12)	20,4 (4) (N=9)	EAHP<LAHP (U=0, p=0,000) EAHP<LALP (U=0, p=0,000)
Dauer des Umgangs mit L2 (Jahre, SD)		26,9 (6) (N=11)	10,3 (6,1) (N=12)	4,8 (3,8) (N=9)	EAHP>LAHP (U=4,5, p=0,000) EAHP>LALP (U=0, p=0,000)
Aufenthaltsdauer in Deutschland (Jahre, M, SD)		13,2 (11) (N=10)	6 (3,4) (N=12)	1,6 (1,1) (N=9)	EAHP>LALP (U=8, p=0,001) LAHP>LALP (U=5, p=0,000)
Mittlerer Umgang mit L2 während verschiedener Altersspannen (in %, M, SD)	0-6 J.	45,4 (19,8) (N=11)	0 (0) (N=12)	0 (0) (N=9)	EAHP>LAHP (U=0, p=0,000) EAHP>LALP (U=0, p=0,000)
	7-14 J.	51,5 (13,8) (N=11)	4,2 (10,3) (N=12)	0 (0) (N=9)	EAHP>LAHP (U=1, p=0,000) EAHP>LALP (U=0, p=0,000)
	15-18 J.	54,5 (13,1) (N=11)	16,7 (26,6) (N=12)	3,7 (7,3) (N=9)	EAHP>LAHP (U=15,5, p=0,001) EAHP>LALP (U=0, p=0,000)
	18 J. bis jetzt	56 (21,4) (N=11)	43 (15) (N=12)	29,6 (16,2) (N=9)	-
Mittlerer Umgang mit L1 während verschiedener Altersspannen (in %, M, SD)	0-6 J.	54,6 (19,8) (N=11)	100 (0) (N=12)	100 (0) (N=9)	EAHP<LAHP (U=0, p=0,000) EAHP<LALP (U=0, p=0,000)
	7-14 J.	48,5 (13,8) (N=11)	95,8 (10,3) (N=12)	100 (0) (N=9)	EAHP<LAHP (U=1, p=0,000) EAHP<LALP (U=0, p=0,000)
	15-18 J.	45,5 (13,1) (N=11)	83,4 (26,6) (N=12)	96,3 (7,3) (N=9)	EAHP<LAHP (U=15,5, p=0,001) EAHP<LALP (U=0, p=0,000)
	18 J. bis jetzt	44 (21,4) (N=11)	57 (15) (N=12)	70,4 (16,2) (N=9)	-
aktueller Umgang mit L1 und L2 (M, SD) (Bereich von 1= nur Italienisch zu 4= beide Sprachen zu 7= nur Deutsch)	Familie	3,7 (2) (N=10)	1,3 (0,9) (N=12)	1 (0) (N=9)	EAHP>LAHP (U=16,5, p=0,003) EAHP>LALP (U=9, p=0,002)
	Freunde	5,1 (1,3) (N=10)	5,1 (0,9) (N=12)	4,1 (1,5) (N=9)	-
	Partner/ Partnerin	5,8 (1) (N=9)	6,1 (1,2) (N=11)	2,3 (2,4) (N=6)	LAHP>LALP (U=8, p=0,01)
	Arbeit	6,1 (1) (N=10)	6,2 (0,7) (N=12)	5 (2,2) (N=9)	-
	Kollegen	6,1 (1,1) (N=10)	6,3 (0,9) (N=12)	4,7 (2,6) (N=9)	-
	Freizeit	5,1 (1,2) (N=10)	5,2 (1) (N=12)	4,2 (1,3) (N=9)	-
	TV/ Radio	5,7 (1,8) (N=10)	6,6 (0,5) (N=12)	5,6 (1,9) (N=9)	-
	Lesen	5 (0,9) (N=10)	4,6 (1) (N=12)	4,1 (1,3) (N=9)	-
	Insg.	5,3 (1) (N=10)	5,1 (0,5) (N=12)	4 (1,4) (N=9)	-

EAHP = früher Zweitspracherwerb und hohes Leistungsniveau; LAHP = später Zweitspracherwerb und hohes Leistungsniveau; LALP = später Zweitspracherwerb und niedriges Leistungsniveau; L1 = Italienisch = Erstsprache; L2 = Deutsch = Zweitsprache; M = Mittelwert; SD = Standardabweichung; Erwerbsalter = Alter beim Zweitspracherwerb; Dauer des Umgangs mit L2 = Alter – Erwerbsalter; Dauer des Aufenthalts = berichtete Anzahl an Jahren, die in Deutschland verbracht wurden; mittlerer Umgang mit L1/L2 = berichteter prozentueller Umgang mit L1/L2 entsprechend den Altersspannen (0-6, 7-14, 15-18 und über 18 Jahre bis zum Untersuchungszeitpunkt); aktueller Umgang mit L1/L2 entsprechend der Lebensbereiche (Skala von 1 [nur L1] bis 7 [nur L2]); U = Mann-Whitney-Test

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Verhaltensdaten

Wie im Methodenteil unter 3.4.1 beschrieben beurteilten die Probanden insgesamt 180 deutsche und italienische Sätze hinsichtlich ihrer Richtigkeit. Die entsprechende *Verhaltensleistung* wurde innerhalb und außerhalb des Scanners erhoben (innerhalb: Genauigkeit der Reaktion, die Probanden gaben ihre Antwort jeweils nach 4 Sekunden bei Erscheinen des Fixationskreuzes, um prämotorische und motorische Aktivierungen zu kontrollieren; außerhalb: Genauigkeit der Reaktion und Reaktionszeit, die Probanden gaben ihre Antwort so schnell und korrekt als möglich). Außerdem wurde das Sprachleistungsniveau mit zwei *Sprachtests* (siehe 3.4.3) erhoben. Abbildung 8 stellt die Ergebnisse dar. Sämtliche Mittelwerte, Standardabweichungen und die entsprechenden Statistiken sind in Tabelle 7 dargestellt.

In den Sprachtests und der Verhaltensleistung unterschieden sich die entsprechenden Gruppen erwartungsgemäß:

#### Vergleich der Gruppen in L2

- Es gab keinen signifikanten Unterschied zwischen der **EAHP- und LAHP-**Gruppe in den Sprachtests in L2 und in der Verhaltensleistung (Genauigkeit und Reaktionszeiten).
- Es gab einen signifikanten Unterschied zwischen der **EAHP- und LALP-**Gruppe in den Sprachtests in L2 und in der Verhaltensleistung (Genauigkeit und Reaktionszeiten). Die LALP-Gruppe zeigte sowohl bei der Semantik als auch der Grammatik signifikant schlechtere Leistungen als die EAHP-Gruppe.
- Es gab einen signifikanten Unterschied zwischen der **LAHP- und LALP-**Gruppe in den Sprachtests in L2 und in der Verhaltensleistung. Die LALP-Gruppe hatte eine signifikant schlechtere Genauigkeit der Reaktionen als die LAHP-Gruppe, die beiden Gruppen unterschieden sich aber nicht hinsichtlich der Reaktionszeiten.

Die drei Gruppen unterschieden sich nicht voneinander im Sprachleistungsniveau der Erstsprache (Zeitungssprachtest, Genauigkeit und Reaktionszeiten in L1).

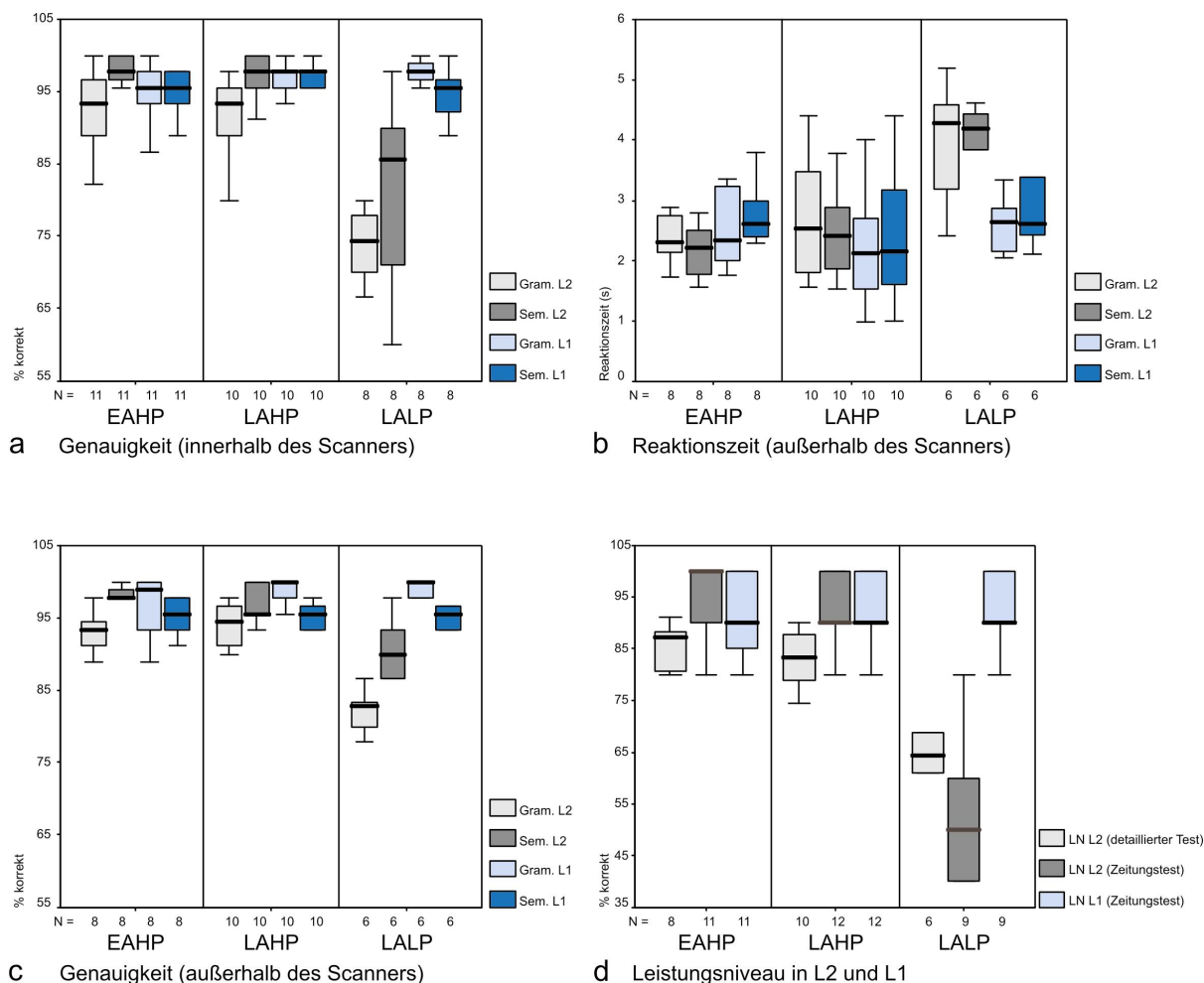
Vergleich von L1 und L2 innerhalb der Gruppen:

- Zeitungstest: Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen dem Sprachleistungsniveau in L1 und L2 in beiden Gruppen mit hohem Leistungsniveau (EAHP und LAHP). In der LALP-Gruppe zeigte sich ein signifikant besseres Leistungsniveau in L1 im Vergleich zu L2.
- Verhaltensleistung: Es zeigte sich eine schlechtere Genauigkeit beim semantischen Urteilen in L1 im Vergleich zu L2 in der EAHP-Gruppe, jedoch zeigten sich keine unterschiedlichen Reaktionszeiten. Die LAHP-Gruppe zeigte schlechtere Leistungen (Genauigkeit und Reaktionszeiten) in der grammatikalischen Kondition L2 verglichen mit L1. Die LALP-Gruppe hatte schlechtere Leistungen (Genauigkeit und Reaktionszeiten) beim semantischen als auch grammatikalischen Urteilen in L2 verglichen mit L1.

Tabelle 7. Verhaltensdaten

		EAHP	LAHP	LALP	signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen	signifikante Unterschiede innerhalb der Gruppen
N		11	12	9		
Verhaltensleistung innerhalb des Scanners (% korrekt, M, SD)	Gram. L2	92,5 (5,8) (N=11)	91,6 (6,2) (N=10)	73,9 (4,9) (N=8)	EAHP besser LALP (U=0, p=0,000) LAHP besser LALP (U=1, p=0,000)	EAHP: Sem.L2 besser Sem.L1 (Z=-2,3 p=0,019) LAHP: Gram.L2 schlechter Gram.L1 (Z=-2,4, p=0,017)
	Sem. L2	97 (4,5) (N=11)	96,9 (3) (N=10)	81,4 (12,7) (N=8)	EAHP besser LALP (U=8,5, p=0,002) LAHP besser LALP (U=6, p=0,001)	LALP: Gram.L2 schlechter Gram.L1 (Z=-2,5, p=0,011) LALP: Sem.L2 schlechter Sem.L1 (Z=-2,4, p=0,018)
	Gram. L1	91,3 (13,8) (N=11)	96,9 (2,8) (N=10)	96,9 (3,6) (N=8)	-	
	Sem. L1	93,5 (6,6) (N=11)	97,1 (1,5) (N=10)	94,7 (3,6) (N=8)	-	
Verhaltensleistung außerhalb des Scanners (% korrekt, M, SD)	Gram. L2	93,1 (2,8) (N=8)	93,3 (4,7) (N=10)	82,2 (3,1) (N=6)	EAHP besser LALP (U=0, p=0,001) LAHP besser LALP (U=3,5, p=0,002)	EAHP: Sem.L2 besser Sem.L1 (Z=-2,0, p=0,04) LAHP: Gram.L2 schlechter Gram.L1 (Z=-2,4, p=0,015)
	Sem. L2	98,1 (1,4) (N=8)	96,4 (2,6) (N=10)	90,7 (4,7) (N=6)	EAHP besser LALP (U=3,5, p=0,005)	LALP: Gram.L2 schlechter Gram.L1 (Z=-2,2, p=0,027)
	Gram. L1	96,7 (4,3) (N=8)	98,4 (2,4) (N=10)	98,5 (2,7) (N=6)	-	
	Sem. L1	95,3 (2,5) (N=8)	95,6 (1,7) (N=10)	95,2 (1,5) (N=6)	-	
Reaktionszeiten außerhalb des Scanners (in s, M, SD)	Gram. L2	2,4 (0,4) (N=8)	2,6 (1) (N=10)	4 (1) (N=6)	EAHP schneller LALP (U=4, p=0,008)	LAHP: Gram.L2 langsamer Gram.L1 (Z=-2,7, p=0,008)
	Sem. L2	2,2 (0,4) (N=8)	2,6 (1) (N=10)	3,9 (0,9) (N=6)	EAHP schneller LALP (U=4, p=0,008)	LALP: Gram.L2 langsamer Gram.L1 (Z=-2,2, p=0,028)
	Gram. L1	2,5 (0,6) (N=8)	2,2 (0,9) (N=10)	2,6 (0,5) (N=6)	-	LALP: Sem.L2 langsamer Sem.L1 (Z=-2,2, p=0,028)
	Sem. L1	2,6 (0,7) (N=8)	2,4 (1) (N=10)	2,8 (0,5) (N=6)	-	
Leistungsniveau L1: Zeitungstest (max. 10 Punkte, M, SD)		9,1 (0,8) (N=11)	9,2 (0,7) (N=12)	9,2 (0,8) (N=9)	-	LALP: L1 besser L2 (Z= -2,7; p= 0,007)
Leistungsniveau L2: Zeitungstest (max. 10 Punkte, M, SD)		9,5 (0,8) (N=11)	9,2 (0,8) (N=12)	4,7 (2,8) (N=9)	EAHP besser LALP (U=2, p=0,000) LAHP besser LALP (U=2, p=0,000)	
Leistungsniveau L2: ausführlicher Sprachtest (max. 90 Punkte, M, SD)		76,9 (3,9) (N=8)	74,4 (4,8) (N=10)	55,7 (16,2) (N=6)	EAHP besser LALP (U=3, p=0,005) LAHP besser LALP (U=5, p=0,005)	

EAHP = früher Zweitspracherwerb und hohes Leistungsniveau; LAHP = später Zweitspracherwerb und hohes Leistungsniveau; LALP = später Zweitspracherwerb und niedriges Leistungsniveau; L1 = Italienisch = Erstsprache; L2 = Deutsch = Zweitsprache; M = Mittelwert; SD = Standardabweichung; Gram. = grammatikalische Beurteilung; Sem. = semantische Beurteilung; Verhaltensleistung wurde erhoben (i) innerhalb des Scanners (Genauigkeit) (ii) außerhalb der Scanners (Genauigkeit und Reaktionszeit; erhoben nach der fMRT-Untersuchung); Leistungsniveau = sprachliches Leistungsniveau (erhoben über einen kurzen Sprachtest [Lesen eines kurzen Zeitungsartikels in L1/L2 und schriftliche Beantwortung von je 5 Fragen, Maximum = 10 Punkte] und über einen ausführlichen Sprachtest in L2 [Maximum = 90 Punkte]); reduziertes N auf Grund der Verfügbarkeit der Probanden oder nicht funktionierender Aufnahmetechnik; U = Mann-Whitney-Test; Z = Wilcoxon-Test

**Abbildung 8.**

**Verhaltensdaten. Prüfung der Parallelität der Gruppen und Vergleich von L1 und L2 innerhalb der Gruppen.** Dargestellt sind die innerhalb des Scanners erhobene Genauigkeit (a), die außerhalb des Scanners erhobene Reaktionszeit (b) und Genauigkeit (c) sowie das Leistungsniveau, bestimmt mit dem detaillierten Sprachtest in L2 und den kurzen Zeitungstests in L2 und L1 (d). Die LALP-Gruppe ist signifikant langsamer und weniger akkurat als die beiden Gruppen mit hohem Leistungsniveau (LAHP- und EAHP-Gruppe), die EAHP- und LAHP-Gruppen unterscheiden sich nicht signifikant voneinander, siehe auch Tabelle 7. Median, Quartile und Datenbereich sind angegeben. EAHP = früher Zweitspracherwerb und hohes Leistungsniveau; LAHP = später Zweitspracherwerb und hohes Leistungsniveau; LALP = später Zweitspracherwerb und niedriges Leistungsniveau; L1 = Italienisch = Erstsprache; L2 = Deutsch = Zweitsprache; Gram = Grammatikalische Aufgabe; Sem. = Semantische Aufgabe; LN = Leistungsniveau; reduziertes N auf Grund der Verfügbarkeit der Probanden oder nicht funktionierender Aufnahmetechnik; Abbildung entnommen und adaptiert aus (Wartenburger et al., 03).



## 4.2 Ergebnisse der funktionell bildgebenden Untersuchung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Gruppenanalyse der fMRT-Untersuchung berichtet.

### 4.2.1 Konditionen vs. Ruhe

In allen drei Gruppen führte der Vergleich der einzelnen Konditionen zur Ruhebedingung zwischen den Blöcken (passives Fixieren des Fixationskreuzes) zu ausgedehnten Aktivierungen der Sprachareale (linke mittlere und inferiore frontale Areale, bilaterale Insel, rechte inferiore frontale und linke temporo-parietale Areale) und occipitaler Regionen.

Um die Unterschiede zwischen den Gruppen statistisch zu überprüfen wurden gemäß den Hypothesen im Folgenden die einzelnen Gruppen (EAHP vs. LAHP bzw. LAHP vs. LALP und vice versa) miteinander verglichen (siehe 4.2.2) sowie die Erst- und Zweitsprache innerhalb der Gruppen miteinander verglichen (semantisches Urteilen L2 vs. L1 sowie grammatikalisches Urteilen L2 vs. L1; siehe 4.2.3).

### 4.2.2 Vergleich der drei Gruppen untereinander

#### 4.2.2.1 Grammatikalische Aufgabe

Die im Folgenden berichteten Areale zeigten im Gruppenvergleich eine zusätzliche oder stärkere Aktivierung während der grammatikalischen Aufgabe. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 und in Abbildung 9 dargestellt.

Im grammatikalischen Urteilen in der Zweitsprache zeigte die LAHP-Gruppe im Vergleich zur EAHP-Gruppe bilaterale größere Aktivierungen im inferioren frontalen Gyrus (Brodmann Areal [BA] 44 und 44/6) (Abbildung 9a). Hingegen zeigte die EAHP-Gruppe keine größere Aktivierung im Vergleich zur LAHP-Gruppe.

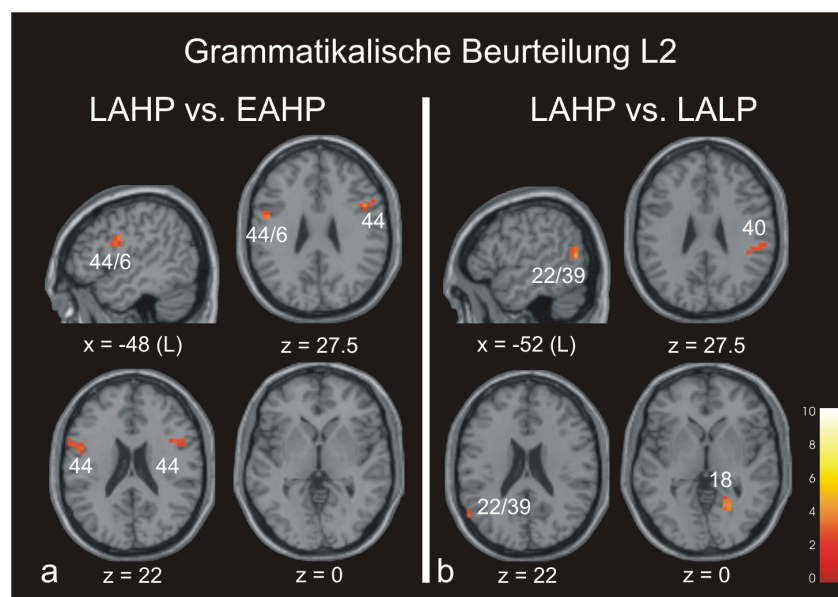
Die LAHP-Gruppe zeigte im Vergleich zur LALP-Gruppe eine größere Aktivierung in der linksseitigen temporo-parietalen Übergangsregion (BA 22/39), im rechten lingualen Gyrus (BA

18) und im rechtsseitigen inferioren parietalen Lobulus (BA 40) (Abbildung 9b). Der entgegengesetzte Vergleich (LALP vs. LAHP) zeigte keine größeren Aktivierungen.

**Tabelle 8. Vergleich der Gruppen bei grammatikalischem Urteilen in L2**

		Cluster Größe	T Wert	Koordinaten			BA	Seite	Anatomische Region
				x	y	z			
Grammatikalisches Urteilen L2	EAHP-LAHP								
	LAHP-EAHP	12	4,09	-48	0	28	44/6	L	inferiorer frontaler Gyrus
		13	4,21	48	12	28	44	R	inferiorer frontaler Gyrus
	LAHP-LALP	10	4,71	-52	-64	11	22/39	L	temporo-parietaler Übergang
		13	4,63	24	-60	0	18	R	lingualer Gyrus
		15	4,55	56	-32	33	40	R	inferiorer parietaler Lobulus
	LALP-LAHP								

Für jeden Vergleich sind die Größe der Cluster, T Werte, Koordinaten der lokalen Signifikanzmaxima im Montreal Neurological Institute (MNI) Koordinatensystem, die Brodmann Areale (BA), die Seite der Aktivierung und die entsprechende anatomische Region angegeben. Die Voxel sind aktiviert bei einem  $p < 0,005$  (unkorrigiert). EAHP = früher Zweitspracherwerb und hohes Leistungsniveau; LAHP = später Zweitspracherwerb und hohes Leistungsniveau; LALP = später Zweitspracherwerb und niedriges Leistungsniveau; L2 = Deutsch = Zweitsprache; L = linke und R = rechte Hemisphäre



**Abbildung 9.**

Vergleich der Gruppen beim grammatikalischen Urteilen in L2. Ergebnisse der Gruppenanalyse [N = 11, 12 bzw. 9] auf dem MNI Template 'colin27' in neurologischer Konvention [links ist links]; Brodmann Areale, x und z Koordinaten sind angegeben; EAHP = früher Zweitspracherwerb hohes Leistungsniveau; LAHP = später Zweitspracherwerb hohes Leistungsniveau; LALP = später Zweitspracherwerb niedriges Leistungsniveau; L2 = Deutsch = Zweitsprache; Abbildung entnommen und adaptiert aus (Wartenburger et al., 03).

#### 4.2.2.2 Semantische Aufgabe

Die im Folgenden berichteten Areale zeigten im Gruppenvergleich eine zusätzliche oder stärkere Aktivierung während der semantischen Aufgabe. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 und in Abbildung 10 dargestellt.

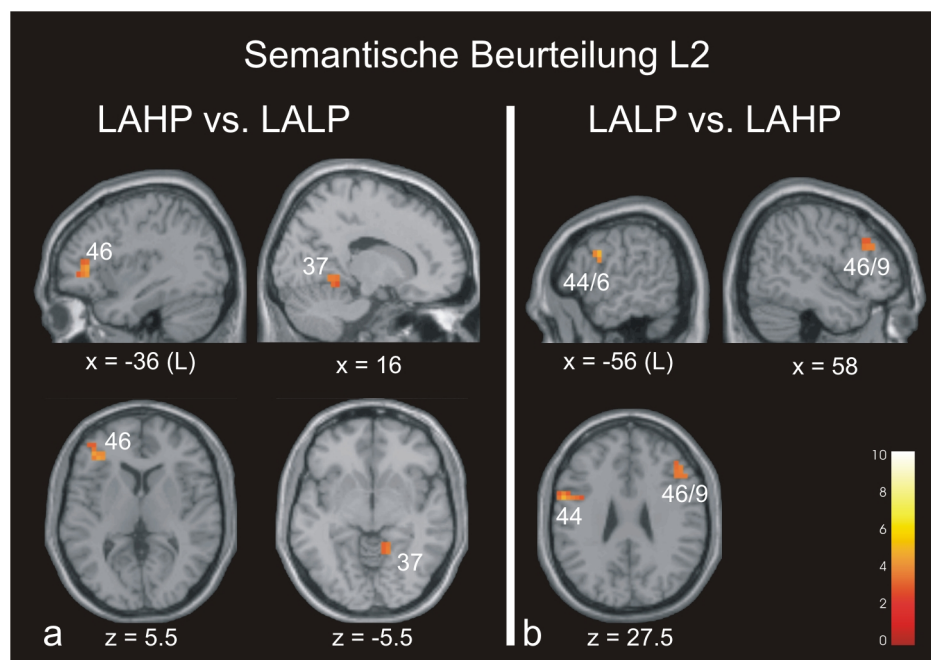
Beim Vergleich des semantischen Urteilens in L2 zeigten sich keinerlei Unterschiede zwischen den beiden Gruppen mit hohem Leistungsniveau (EAHP- und LAHP-Gruppe). Die LAHP-Gruppe zeigte größere Aktivierungen der linken mittleren frontalen Areale (BA 46) und im rechten fusiformen Gyrus (BA 37) im Vergleich zu LALP-Gruppe, welche hingegen eine größere Aktivierung in linkshemisphärischen inferioren frontalen (BA 44/6) und rechts-hemisphärischen mittleren frontalen Arealen (BA 46/9) im Vergleich zur LAHP-Gruppe zeigte.

Die linksseitige inferiore frontale Aktivierung der LALP-Gruppe war in der Pars Opercularis (Broca-Areal, BA 44/6) lokalisiert (Abbildung 10b), wohingegen die Aktivierung der LAHP-Gruppe den linksseitigen mittleren frontalen Gyrus, BA 46, umfasste (Abbildung 10a).

**Tabelle 9. Vergleich der Gruppen bei semantischem Urteilen in L2**

		Cluster Größe	T Wert	Koordinaten			BA	Seite	Anatomische Region
				x	y	z			
Semantisches Urteilen L2	EAHP-LAHP								
	LAHP-EAHP								
	LAHP-LALP	33	4,39	-36	36	6	46	L	mittlerer frontaler Gyrus
			3,35	-28	44	11			
		10	3,61	16	-48	-6	37	R	fusiformer Gyrus
	LALP-LAHP	10	4,80	-56	4	28	44/6	L	inferiorer frontaler Gyrus
		12	3,62	48	32	28	46/9	R	mittlerer frontaler Gyrus
			3,54	52	20	33			

Für jeden Vergleich sind die Größe der Cluster, T Werte, Koordinaten der lokalen Signifikanzmaxima im MNI Koordinatensystem, die Brodmann Areale (BA), die Seite der Aktivierung und die entsprechende anatomische Region angegeben. Die Voxel sind aktiviert bei einem  $p < 0,005$  (unkorrigiert). EAHP = früher Zweitspracherwerb und hohes Leistungsniveau; LAHP = später Zweitspracherwerb und hohes Leistungsniveau; LALP = später Zweitspracherwerb und niedriges Leistungsniveau; L2 = Deutsch = Zweitsprache; L = linke und R = rechte Hemisphäre



**Abbildung 10.**

Vergleich der Gruppen beim semantischen Urteilen in L2. Ergebnisse der Gruppenanalyse [N = 12 bzw. 9] auf dem MNI Template 'colin27' in neurologischer Konvention [links ist links]; Brodmann Areale, x und z Koordinaten sind angegeben; LAHP = später Zweitspracherwerb hohes Leistungsniveau; LALP = später Zweitspracherwerb niedriges Leistungsniveau; L2 = Deutsch = Zweitsprache.

### 4.2.3 Vergleich der Konditionen innerhalb der Gruppen

Die im Folgenden berichteten Areale zeigten eine zusätzliche oder stärkere Aktivierung der Zweitsprache im Vergleich zur Erstsprache innerhalb der Gruppen.

#### 4.2.3.1 Grammatikalische Aufgabe

In Tabelle 10 und Abbildung 11 sind die Ergebnisse des Vergleiches der grammatikalischen Aufgabe L2 mit der grammatikalischen Aufgabe L1 dargestellt.

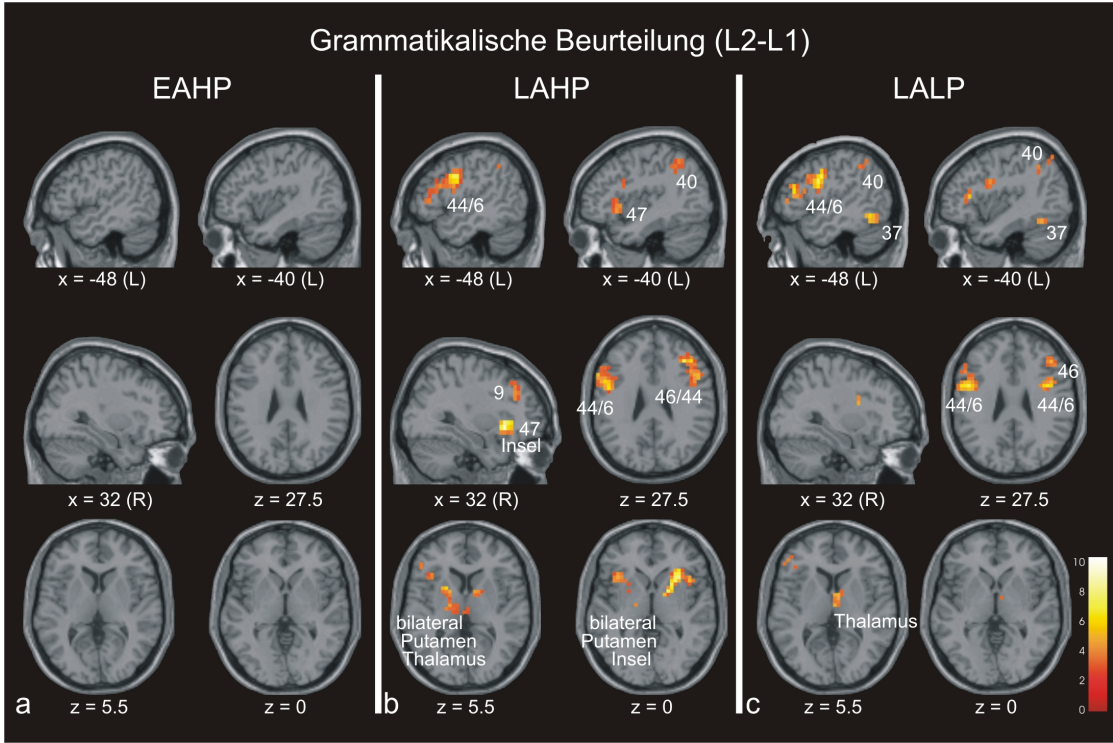
Die **EAHP-Gruppe** zeigt keinerlei sprachspezifische Unterschiede zwischen den beiden Aufgaben (Abbildung 11a). Der Vergleich von L2 und L1 innerhalb der **LAHP-Gruppe** zeigte

bilaterale Aktivierungen im inferioren frontalen Gyrus (BA 44, 47), der anterioren Insel, dem Putamen, Thalamus und dorsal mesial frontalen Kortex (BA 8), im linken inferioren frontalen Gyrus (Pars Opercularis des Broca Areal, BA 44/6), in linken inferioren parietalen Arealen (BA 40), im linken Nukleus Caudatus und im rechten mittleren frontalen Gyrus (BA 46/9) (Abbildung 11b). Die **LALP-Gruppe** zeigte beim Vergleich der Zweit- zur Erstsprache bilaterale Aktivierungen des inferioren frontalen Gyrus (Pars Opercularis des Broca Areal, BA 44/6) und im Thalamus. Zusätzlich wurden auch der linke inferiore parietale Kortex (BA 40/7), der linke präzentrale (BA 6) und fusiforme Gyrus (BA 37) sowie rechtshemisphärische mittlere frontale Regionen (BA 46/9) aktiviert (Abbildung 11c).

**Tabelle 10. Vergleich des grammatikalischen Urteilens L2 vs. L1 innerhalb der drei Gruppen.**

		Cluster Größe	T Wert	Koordinaten			BA	Seite	Anatomische Region
				x	y	z			
Grammatikalisches Urteilen L2-L1	EAHP								
	LAHP	116	7,63	-48	4	33	44/6	L	inferiorer frontaler Gyrus
			5,54	-60	16	28	44		
			5,29	-56	8	17	44		
		62	6,06	-20	8	6		L	Putamen/Thalamus
			5,71	-32	20	-6	47	L	inferiorer frontaler Gyrus /anteriore Insel
			4,87	-20	0	17		L	Nukleus Caudatus
		14	4,62	0	40	44	8	L/R	mesialer frontaler Gyrus
			4,15	-8	36	44	8	L	
		64	6,61	-32	-68	44	40	L	inferiorer parietaler Lobulus
			4,93	-44	-48	39	40		
			4,43	-28	-60	39	40		
		93	7,34	36	32	28	46	R	mittlerer frontaler Gyrus
			7,00	44	28	39	9		
			5,87	52	12	33	44		
		65	10,30	28	20	-6	47	R	inferiorer frontaler Gyrus /anteriore Insel
			7,95	20	4	0		R	Putamen/Thalamus
			5,47	44	16	0	47	R	inferiorer frontaler Gyrus
	LALP	122	7,93	-52	0	39	6	L	präzentraler Gyrus
			7,66	-56	4	22	44/6	L	inferiorer frontaler Gyrus
			7,42	-48	4	28	44/6		
		29	7,20	-16	-8	17		L	Thalamus
		19	6,38	-44	-52	-17	37	L	fusiformer Gyrus
		19	8,55	-32	-68	44	7	L	inferiorer parietaler Lobulus
		14	4,93	-44	-52	44	40	L	inferiorer parietaler Lobulus
			3,96	-52	-44	50	40		
			3,93	-60	-40	50	40		
		32	6,41	40	4	28	44/6	R	inferiorer frontaler Gyrus
			3,82	56	12	33	44/6		
		16	5,10	44	32	28	46/9	R	mittlerer frontaler Gyrus
		28	6,50	4	-12	11		R	Thalamus
			6,12	16	-16	22			
			5,19	8	0	6			

Für jeden Vergleich sind die Größe der Cluster, T Werte, Koordinaten der lokalen Signifikanzmaxima im MNI Koordinatensystem, die Brodmann Areale (BA), die Seite der Aktivierung und die entsprechende anatomische Region angegeben. Die Voxel sind aktiviert bei einem  $p < 0,005$  (unkorrigiert). EAHP = früher Zweitspracherwerb und hohes Leistungsniveau; LAHP = später Zweitspracherwerb und hohes Leistungsniveau; LALP = später Zweitspracherwerb und niedriges Leistungsniveau; L1=Italienisch = Erstsprache; L2 = Deutsch = Zweitsprache; L = linke und R = rechte Hemisphäre



**Abbildung 11.**

Vergleich des grammatikalischen Urteilens L2 vs. L1 innerhalb der drei Gruppen. Ergebnisse der Gruppenanalyse [N = 11, 12 bzw. 9] auf dem MNI Template 'colin27' in neurologischer Konvention [links ist links]; Brodmann Areale, x und z Koordinaten sind angegeben; EAHP = früher Zweitspracherwerb hohes Leistungsniveau; LAHP = später Zweitspracherwerb hohes Leistungsniveau; LALP = später Zweitspracherwerb niedriges Leistungsniveau; L1 = Italienisch = Erstsprache; L2 = Deutsch = Zweitsprache; Abbildung entnommen und adaptiert aus (Wartenburger et al., 03).

#### 4.2.3.2 Semantische Aufgabe

In Tabelle 11 und Abbildung 12 sind die Ergebnisse des Vergleichs des semantischen Urteils L2 im Vergleich zum semantischen Urteilen L1 dargestellt.

Die **EAHP-Gruppe** zeigte keine sprachspezifischen Unterschiede zwischen den beiden Sprachen (Abbildung 12a). Die **LAHP-Gruppe** zeigte bilaterale Aktivierungen im inferioren frontalen Gyrus (BA 47) und der Insel beim Vergleich von L2 und L1 (Abbildung 12b). Die **LALP-Gruppe** zeigte größere Aktivierungen im semantischen Urteilen L2 im Vergleich zu L1 im links-hemisphärischen inferioren und mittleren frontalen Gyrus (BA 44/6, 9). Rechtshemisphärische

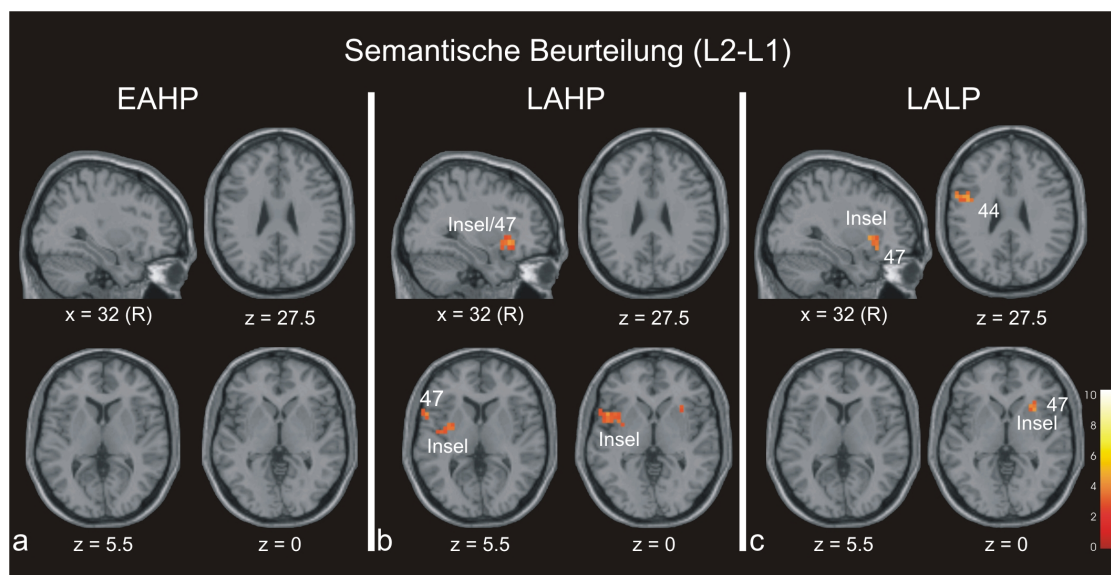


Aktivierungen zeigten sich in inferioren frontalen Regionen (BA 47) und der Insel (Abbildung 12c). Damit zeigten beide Gruppen mit spätem Zweitspracherwerb eine bilateral größere Aktivierung der inferioren frontalen Areale beim semantischen Urteilen in L2, die Aktivierung der LALP-Gruppe lag im Broca-Areal (BA 44) während die Aktivierung der LAHP-Gruppe weiter inferiore Areale (BA 47) umfasste.

**Tabelle 11. Vergleich des semantischen Urteilens L2 vs. L1 innerhalb der drei Gruppen**

		Cluster Größe	T Wert	Koordinaten			BA	Seite	Anatomische Region
				x	y	z			
Semantisches Urteilen L2-L1	EAHP								
	LAHP	47	4,92	-40	12	-6	47	L	inferiorer frontaler Gyrus /anteriore Insel
			4,69	-48	12	0	47	L	inferiorer frontaler Gyrus
			4,68	-56	8	-6	47	L	inferiorer frontaler Gyrus
		11	4,92	32	20	-6	47	R	inferiorer frontaler Gyrus /anteriore Insel
	LALP	30	4,94	-44	4	28	44/6	L	inferiorer frontaler Gyrus
			4,57	-56	4	28	44/6	L	inferiorer frontaler Gyrus
			4,37	-52	4	39	9/44	L	mittlerer frontaler Gyrus
		11	4,74	32	16	0	47	R	inferiorer frontaler Gyrus /Insel
			4,29	32	24	-11	47	R	inferiorer frontaler Gyrus /Insel

Für jeden Vergleich sind die Größe der Cluster, T Werte, Koordinaten der lokalen Signifikanzmaxima im MNI Koordinatensystem, die Brodmann Areale (BA), die Seite der Aktivierung und die entsprechende anatomische Region angegeben. Die Voxel sind aktiviert bei einem  $p < 0,005$  (unkorrigiert). EAHP = früher Zweitspracherwerb und hohes Leistungsniveau; LAHP = später Zweitspracherwerb und hohes Leistungsniveau; LALP = später Zweitspracherwerb und niedriges Leistungsniveau; L1=Italienisch = Erstsprache; L2 = Deutsch = Zweitsprache; L = linke und R = rechte Hemisphäre



**Abbildung 12.**

Vergleich des semantischen Urteils L2 vs. L1 innerhalb der drei Gruppen. Ergebnisse der Gruppenanalyse [N = 11, 12 bzw. 9] auf dem MNI Template 'colin27' in neurologischer Konvention [links ist links]; Brodmann Areale, x und z Koordinaten sind angegeben; EAHP = früher Zweitspracherwerb hohes Leistungsniveau; LAHP = später Zweitspracherwerb hohes Leistungsniveau; LALP = später Zweitspracherwerb niedriges Leistungsniveau; L1 = Italienisch = Erstsprache; L2 = Deutsch = Zweitsprache; Teile der Abbildung entnommen und adaptiert aus (Wartenburger et al., 03).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich in keiner der drei Gruppen eine zusätzliche oder stärkere Aktivierung der Erstsprache im Vergleich zur Zweitsprache, weder in der semantischen noch in der grammatikalischen Kondition, zeigte. Das heißt, die Verarbeitung der Erstsprache führte immer zu einer gleichartigen oder kleineren zerebralen Aktivierung als die Verarbeitung der Zweitsprache. In den Gruppen mit spätem Spracherwerb zeigte sich eine relativ größere Aktivierung der Zweitsprache im Vergleich zur Erstsprache. Zu betonen ist aber, dass sich das zerebrale Aktivierungsmuster der Gruppe mit spätem Spracherwerb und hohem Leistungsniveau (LAHP) lediglich im grammatikalischen Urteilen, nicht jedoch dem semantischen Urteilen, von der Gruppe mit frühem Spracherwerb und hohem Leistungsniveau (EAHP) unterscheidet (siehe 4.2.2).

#### 4.2.4 Zu den Hypothesen

Es können somit folgende Hypothesen (siehe 2.4.3) angenommen bzw. verworfen werden:

##### 4.2.4.1 Zum Einfluss des Sprachleistungsniveaus

- Die Prüfhypothese 1 muss verworfen werden und die Alternativhypothese 1 angenommen werden: **Es gibt einen Einfluss des Leistungsniveaus auf das zerebrale Aktivierungsmuster bei semantischen Urteilsprozessen** in der Zweitsprache. Beim Vergleich des semantischen Urteilens zeigen sich u.a. im Broca-Areal Aktivierungsunterschiede zwischen den Gruppen mit spätem Spracherwerb und unterschiedlichem Leistungsniveau (bei kontrolliertem spätem Spracherwerbsalter).
- Die Prüfhypothese 2 muss verworfen werden und die Alternativhypothese 2 angenommen werden: **Es gibt einen Einfluss des Leistungsniveaus auf das zerebrale Aktivierungsmuster bei grammatikalischen Urteilsprozessen** in der Zweitsprache. Die LALP-Gruppe zeigte keine größeren Aktivierungen als die LAHP-Gruppe. Die LAHP-Gruppe zeigte jedoch im Vergleich zur LALP-Gruppe größere Aktivierungen in temporo-parietalen und occipitalen Arealen.

##### 4.2.4.2 Zum Einfluss des Spracherwerbsalters

- Die Prüfhypothese 1 muss verworfen werden und die Alternativhypothese 1 angenommen werden: **Es gibt einen Einfluss des Erwerbsalters auf das zerebrale Aktivierungsmuster bei semantischen Urteilsprozessen** in der Zweitsprache. In der LAHP-Gruppe zeigte sich, trotz gleicher Verhaltensleistungen, eine größere Aktivierung bei semantischem Urteilen in L2 im Vergleich zu L1 in der bilateralen Inselregion. Zu beachten ist aber, dass sich beim Vergleich zur EAHP-Gruppe keine zusätzliche Aktivierung zeigt, was darauf hinweist, dass der Effekt des Erwerbsalters auf die Semantik nur gering und schwächer ist als der Effekt des Erwerbsalters auf die Grammatik.
- Die Prüfhypothese 2 muss verworfen werden und die Alternativhypothese 2 angenommen werden: **Es gibt einen Einfluss des Erwerbsalters auf das zerebrale Aktivierungsmuster bei grammatikalischen Urteilsprozessen** in der Zweitsprache. Beim Vergleich des grammatikalischen Urteilens zeigt sich u.a. im Broca-Areal eine größere Aktivierung in der

Gruppe mit spätem Erwerbsalter im Vergleich zur Gruppe mit frühem Erwerbsalter (bei kontrolliertem Leistungsniveau).

### 4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Beim Vergleich der zerebralen Repräsentation der Verarbeitung der Zweitsprache zeigten sich substantielle Unterschiede in der Amplitude und Größe der Aktivierung zwischen den verschiedenen Gruppen mit unterschiedlichem Erwerbsalter und unterschiedlichem Sprachleistungsniveau. Es zeigte sich ein differentieller, aufgabenspezifischer Effekt des Erwerbsalters auf die grammatikalische Verarbeitung. Beide Gruppen mit hohem Leistungsniveau unterschieden sich nicht im Aktivierungsmuster der semantischen Aufgabe in L2, bei der grammatikalischen Aufgabe in L2 hingegen zeigte die LAHP-Gruppe eine deutlich größere Aktivierung als die EAHP-Gruppe. Das Leistungsniveau hingegen zeigte einen Einfluss auf die semantische Verarbeitung, während das Erwerbsalter dabei eine geringere Rolle spielte. Die LALP-Gruppe zeigte u.a. im Broca-Areal größere Aktivierungen während der semantischen Aufgabe in L2, jedoch keine zusätzliche Aktivierung im grammatikalischen Urteilen in L2 im Vergleich zur LAHP-Gruppe.

## 5 Diskussion

In dieser Studie wurde der Einfluss von Leistungsniveau und Erwerbsalter auf das zerebrale Aktivierungsmuster bei semantischer und grammatikalischer Verarbeitung der Zweitsprache untersucht. Erwerbsalter und Leistungsniveau haben einen unterschiedlich starken Einfluss auf die zerebrale Repräsentation grammatikalischer und semantischer Urteilsprozesse. Es ergaben sich zwei Hauptergebnisse:

- Das *Sprachleistungsniveau* ist die Hauptdeterminante der zerebralen Verarbeitung *semantischer* Entscheidungen in der Zweitsprache.
- Das *Alter beim Zweitspracherwerb* ist die Hauptdeterminante der zerebralen Verarbeitung *grammatikalischer* Entscheidungen in der Zweitsprache.

Im Folgenden werden die Ergebnisse zusammengefasst und im Kontext anderer Studien diskutiert. Schließlich werden die Befunde in ein aktuelles Modell der Zweitsprachverarbeitung integriert (siehe 5.3).

## 5.1 Der Einfluss des Leistungsniveaus auf die kortikale Repräsentation der Zweitsprache

### 5.1.1 Der Einfluss des Leistungsniveaus auf die semantische Verarbeitung

Das Leistungsniveau hat einen stärkeren Einfluss als das Erwerbsalter auf die semantische Verarbeitung. Probanden mit spätem Spracherwerb aber unterschiedlichem Leistungsniveau (d.h. LAHP- und LALP-Gruppe) zeigten unterschiedliche Aktivierungsmuster: Unter den Probanden mit spätem Zweitspracherwerb zeigten diejenigen mit weniger gutem Leistungsniveau (LALP-Gruppe) während der semantischen Aufgabe eine deutlich größere Aktivierung im Broca-Areal und in rechten mittleren frontalen Arealen als diejenigen mit höherem Leistungsniveau (LAHP-Gruppe). Die LAHP-Gruppe hingegen zeigte größere Aktivierungen in den linken mittleren frontalen und den rechten fusiformen Arealen als die LALP-Gruppe. Innerhalb beider Gruppen zeigte sich eine größere Aktivierung bei der Verarbeitung der Zweitsprache im Vergleich zur Erstsprache, in der LAHP-Gruppe war dieser Aktivierungsunterschied aber nicht wie in der LALP-Gruppe mit einer schlechteren Verhaltensleistung assoziiert.

### 5.1.2 Der Einfluss des Leistungsniveaus auf die grammatikalische Verarbeitung

Bei der grammatikalischen Verarbeitung sind die Ergebnisse weniger eindeutig. Hier zeigten sich in der LAHP-Gruppe im Vergleich zur LALP-Gruppe lediglich größere Aktivierungen in posterioren Regionen (linke temporo-parietale Übergangsregion, rechter lingualer Gyrus und rechter inferiorer parietaler Lobulus). Die LALP-Gruppe zeigt trotz schlechterer Verhaltensleistungen keine größere Aktivierung als die LAHP-Gruppe. Dieser Befund weist wiederum auf den deutlicheren Einfluss des Erwerbsalters auf die kortikalen Korrelate grammatikalischer Verarbeitung hin.

Die Ergebnisse werden im Folgenden unter Berücksichtigung aktueller Studien zum Einfluss der Komplexität (5.1.3) und Art der Aufgabe (siehe 5.1.4) diskutiert. Der Zusammenhang von Erwerbsalter und Leistungsniveau und die Implikationen für die Interpretation der Ergebnisse werden unter 5.2.3 diskutiert.

### 5.1.3 Die Komplexität der Aufgabe

Definitionsgemäß zeigt die LALP-Gruppe schlechtere Verhaltensleistungen als die beiden Gruppen mit hohem Leistungsniveau. Bei der *semantischen* Aufgabe weist der Zusammenhang zwischen zerebraler Aktivierung und Verhaltensleistung darauf hin, dass niedrigeres Leistungsniveau zu einer größeren Aktivierung in den Spracharealen führt. Wie schon unter 2.3.2.1 angemerkt gibt es eine Vielzahl an fMRT-Studien, die einen Einfluss des Sprachleistungsniveaus auf die semantische Verarbeitung der Zweitsprache finden: In einer semantischen Zuordnungs-Aufgabe konnte gezeigt werden, dass das geringste Leistungsniveau mit der größten Aktivierung assoziiert ist (Chee et al., 01). Den Probanden wurden visuell simultan drei Begriffe in der Erst- oder Zweitsprache präsentiert und die Probanden mussten das Wort auswählen, welches dem obersten Zielwort in der Bedeutung (d.h. semantisch) am ähnlichsten war („Pyramidens and Palm Test“, (Howard und Patterson, 92)). Eine Wortgenerierungsaufgabe führt in einer nur 2 bis 4 Jahre gelernten Drittsprache zu größeren Aktivierungen als die gut geläufige Erst- und Zweitsprache (Yetkin et al., 96). Die Probanden hatten ein hohes Leistungsniveau in der Erst- und Zweitsprache und es konnten keine signifikanten Aktivierungsunterschiede zwischen diesen beiden Sprachen gefunden werden. Bei drei der sechs Probanden zeigt sich allerdings eine höhere Aktivierung von L2 gegenüber L1. Ebenso zeigen sich bei grammatikalischen und semantischen Urteilen von Chinesisch-Englisch Bilingualen (spätes Erwerbsalter > 10. Lebensjahr) in der weniger gut gesprochenen Zweitsprache größere Aktivierungen in vornehmlich linken frontalen und temporalen Arealen (Luke et al., 02). Alle diese Studien untersuchten den Einfluss des Sprachleistungsniveaus auf die zerebrale Aktivierung indem sie *innerhalb* der Probanden die Aktivierungen während der Verarbeitung der früh erworbenen Erstsprache (hohes Leistungsniveau) mit denen der spät erworbenen Zweit- oder Drittsprache (geringes Leistungsniveau) verglichen. Damit wurde der Einfluss des Sprachleistungsniveaus immer unter dem konfundierenden Effekt des Alters beim Zweitspracherwerb untersucht. Wenn der Effekt des Leistungsniveaus an sich beurteilt werden soll, muss das Alter beim Zweitspracherwerb allerdings konstant gehalten werden, wie es in der vorliegenden Studie der Fall war (Vergleich LAHP- und LALP-Gruppe). Einschränkend muss darauf hingewiesen werden, dass mit der vorliegenden Studie lediglich eine Aussage über den Einfluss des Leistungsniveaus bei der spät erworbenen Zweitsprache gemacht werden kann. Um eine Generalisierung auf die früh erworbene Sprache vornehmen zu dürfen, müssen Probanden mit frühem Spracherwerb aber schlechtem Leistungsniveau (EALP) untersucht werden, z.B. aus



dem Muttersprachland heraus adoptierte Kinder. Eine solche Studie wurde bisher noch nicht durchgeführt.

Verschiedene monolinguale Studien weisen darauf hin, dass größere Komplexität, d.h. eine schwierigere Aufgabe, zu erhöhter kortikaler Aktivierung führt. So konnte mittels fMRT gezeigt werden, dass die klassischen Sprachareale (und zum Teil auch die entsprechenden Areale in der rechten Hemisphäre) mit zunehmender Satzkomplexität (z.B. Passivsätze vs. Aktivsätze) stärker aktiviert werden (Just et al., 96; Carpenter et al., 99). Ebenso zeigen sich bei verschiedenen PET-Untersuchungen linkshemisphärisch größere Aktivierungen bei der Verarbeitung komplexer Sätze im Vergleich zu einfacheren Sätzen (Stromswold et al., 96; Caplan et al., 98; Caplan et al., 99; Caplan et al., 00).

Sowohl diese, als auch die Befunde der vorliegenden Studie, können somit durch eine größere Schwierigkeit der Aufgabe erklärt werden. Gesteigerte Aufgabenschwierigkeit ist mit höherer Aufmerksamkeit assoziiert, die sich über Top-Down-Prozesse in erhöhter neuronaler Aktivierung widerspiegeln kann (siehe (Kastner und Ungerleider, 00; Adler et al., 01; Pessoa et al., 02; van den Heuvel et al., 03)). Bei späten Bilingualen mit mittlerem Leistungsniveau führt die Verarbeitung komplexerer Sätze der Zweitsprache zu stärkerer Aktivierung als die Verarbeitung komplexerer Sätze in der Muttersprache (Hasegawa et al., 02). Für die Probanden mit niedrigerem Leistungsniveau ist die Aufgabe, Sätze in der Zweitsprache *semantisch* auf ihre Plausibilität hin zu beurteilen wesentlich schwerer, als Sätze in der geläufigen Erstsprache zu beurteilen. In dieser Gruppe herrscht größere Unsicherheit über die Richtigkeit der Entscheidung als in der Gruppe mit höherem Leistungsniveau und es kommen neben gesteigerter Aufmerksamkeit wahrscheinlich auch zusätzliche Verarbeitungsprozesse zum tragen, wie z.B. die aktive Suche oder Erschließung von Wortbedeutungen. In der Sprache mit geringem Leistungsniveau kann man nicht „einfach“ oder „automatisch“ entscheiden, ob ein Satz richtig ist oder nicht, sondern muss sich die Bedeutung und Zusammenhänge einzelner Wörter unter Umständen aktiv erschließen bzw. den Satz Wort für Wort übersetzen. Diese größere Schwierigkeit spiegelt sich auch in der Geschwindigkeit der Verarbeitung wieder: In einer weniger gut beherrschten Sprache dauert es in der Regel länger, die Bedeutung von Sätzen zu erfassen und auch die Sprachproduktion ist oftmals verlangsamt. Die hier untersuchten Gruppen mit spätem Spracherwerbsalter unterschieden sich zwar nicht in den Reaktionszeiten, aber die Gruppe mit niedrigem Leistungsniveau machte signifikant mehr Fehler als die Gruppe mit hohem Leistungsniveau. Es ist möglich, dass die Probanden der LALP-Gruppe bei einer

Aufgabe ohne Zeitdruck weniger Fehler gemacht hätten, aber langsamer gearbeitet hätten als die Probanden der LAHP-Gruppe.

Jedoch ist der Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Bildgebung und der Verhaltensleistung bei der **grammatikalischen** Aufgabe nicht so eindeutig: Die schlechtere Verhaltensleistung der LALP-Gruppe im Vergleich zur LAHP-Gruppe spiegelte sich nicht in einer größeren Aktivierung wieder (Tabelle 8 unter 4.2.2). Dieser Befund könnte durch eine größere Motivation/Anstrengung oder die Anwendung kompensatorischer Strategien in der Gruppe mit hohem Leistungsniveau erklärt werden. Die LAHP-Gruppe zeigte in nicht sprachassoziierten Arealen eine größere Aktivierung im Vergleich zur LALP-Gruppe (linker temporo-parietaler Übergang, rechter lingualer Gyrus und inferiore parietale Regionen). Allerdings unterschieden sich die beiden Gruppen nicht in den Reaktionszeiten, was diese Erklärung wiederum weniger plausibel erscheinen lässt. Es kann festgehalten werden, dass es neben dem Effekt des Erwerbsalters auf das grammatikalische Verarbeiten auch einen Effekt des Leistungsniveaus zu geben scheint, der sich vor allem auf der Verhaltensebene (Genauigkeit der Reaktionen) und weniger in zerebralen Aktivierungsmustern widerspiegelt.

#### **5.1.4     Die Art der Aufgabe: Passive vs. aktive Verarbeitung**

Auch die Art der Aufgabe scheint sich auf das Aktivierungsmuster auszuwirken: Bei Probanden mit spätem Zweitspracherwerb und niedrigem Leistungsniveau zeigen sich in einer PET-Untersuchung –im Gegensatz zu den oben unter 5.1.3 erwähnten Studien– bei auditiver passiver Sprachrezeption der Erstsprache größere Areale aktiviert als bei der passiven Verarbeitung der Zweitsprache. Es handelt sich dabei um Probanden mit niedrigem Leistungsniveau in L2, welche die Zweitsprache erst nach dem 7. Lebensjahr erlernt hatten (d.h. wiederum sind die Faktoren Leistungsniveau und Erwerbsalter konfundiert). Bemerkenswert ist, dass es auch keinen Unterschied zwischen L2 und einer völlig unbekannten Sprache gibt. Die Autoren führen dies auf möglicherweise zu schwache Aktivierungen oder zu große interindividuelle Variabilität (vergleiche (Dehaene et al., 97)) zurück, welche sich in der bei PET-Untersuchungen notwendigen Gruppenmittelung aufhebt. Eine andere mögliche Erklärung wäre, dass automatische Verarbeitungsprozesse bei passiven Aufgaben stärker in der Sprache mit sehr hohem Leistungsniveau zum Tragen kommen. Die nur schlecht beherrschte Zweitsprache hingegen kann passiv „überhört“ werden, es werden keine automatischen Assoziationen gebildet. Dies

würde auch erklären, warum die Zweitsprache keine größere Aktivierung hervorruft als eine unbekannte Sprache (Perani et al., 96).

Die in der vorliegenden Studie verwendete Beurteilungsaufgabe war eine aktive Aufgabe, da sich die Probanden bei jedem Satz aktiv entscheiden mussten, ob sie den entsprechenden Satz als korrekt oder inkorrekt einschätzten. Es kam zu einer größeren Aktivierung von L2 bei Probanden mit niedrigerem Leistungsniveau bzw. bei höherer Schwierigkeit der Aufgabe. Die Befunde stehen somit in Übereinstimmung zu den Ergebnissen der Studien mit aktiven Aufgaben: Wenn die schlechter beherrschte Sprache aktiv bearbeitet werden muss, benötigt man mehr Ressourcen, wie z.B. Aufmerksamkeit, was mit gesteigerter Aktivierung einhergeht. Wenn man hingegen bei passiver Rezeption weniger zuhört, braucht man weniger Aktivierung als bei der Erstsprache (vergleiche 5.1.3).

## 5.2 Der Einfluss des Erwerbsalters auf die kortikale Repräsentation der Zweitsprache

### 5.2.1 Der Einfluss des Erwerbsalters auf die semantische Verarbeitung

Das Erwerbsalter hat einen eher geringen Einfluss auf die kortikale Repräsentation der semantischen Verarbeitung. So zeigten sich bei der semantischen Aufgabe weder Aktivierungsunterschiede noch Unterschiede der Verhaltensleistungen in den beiden Gruppen mit hohem Leistungsniveau aber unterschiedlichem Erwerbsalter (d.h. EAHP- und LAHP-Gruppe, mit einem Erwerbsalter von 0 bzw.  $18,9 \pm 6,6$  Jahren). Mit anderen Worten scheint es bei semantischen Aufgaben möglich, die Effekte des späten Spracherwerbs zu verringern und somit gleiche Aktivierungsmuster und gleiche Verhaltensleistungen zu zeigen wie Probanden, die beide Sprachen seit der Geburt erworben haben.

Innerhalb der EAHP-Gruppe zeigten sich keine Unterschiede zwischen Erst- und Zweitsprache. Innerhalb der LAHP-Gruppe jedoch zeigte sich eine größere Aktivierung von L2 im Vergleich zu L1 in der bilateralen Inselregion (BA 47 und Insel) was darauf hinweist, dass das Erwerbsalter zu einem geringen Teil auch die zerebralen Korrelate der semantischen Verarbeitung beeinflusst. Dieser Befund der größeren Aktivierung in L2 trotz gleicher Verhaltensleistungen könnte verursacht sein durch zugrundeliegende kompensatorische Mechanismen, welche zusätzliche Hirnaktivierungen hervorrufen, die aber im Vergleich zur zweisprachig aufgewachsenen Gruppe nicht signifikant sind.

Eine PET-Studie (Perani et al., 98) findet ebenfalls keine Aktivierungsunterschiede zwischen Probanden mit frühem und spätem Zweitspracherwerb (das Erwerbsalter lag unter dem 4. bzw. über dem 10. Lebensjahr) und hohem Leistungsniveau bei passivem Zuhören. Untersucht wurden italienisch-englischsprachige Probanden mit spätem Zweitspracherwerb und Probanden mit frühem Erwerb von Spanisch und Katalanisch. Ein Vergleich zu ihrer oben erwähnten früheren Studie (Perani et al., 96) lässt die Autoren schlussfolgern, dass sich bei dieser Aufgabenart das Leistungsniveau stärker als das Erwerbsalter auf die kortikale Repräsentation der Zweitsprache auswirkt. Bei einer anderen vornehmlich semantischen Aufgabe zeigt sich ebenfalls kein Effekt des Erwerbsalters auf die Repräsentation der Zweitsprache: Mittels fMRT wurde die zerebrale Aktivierung während einer Wort-Generierungsaufgabe gemessen. Die

Probanden hatten die Aufgabe, einen vorgegebenen Wortstamm rechts (z.B. COU... – COUPLE) oder links (z.B. ...EST – CREST) zu vervollständigen. Es zeigen sich stark überlappende Aktivierungsmuster bei frühen (Erwerbsalter < 6) und späten (Erwerbsalter > 12) Bilingualen mit hohem Leistungsniveau. Kein Proband zeigt signifikante Unterschiede in der Lokalisation des Maximums der Aktivierung der Erstsprache (Mandarin) und Zweitsprache (Englisch) (Chee et al., 99).

Im Gegensatz dazu wurde ein Einfluss des Erwerbsalters auf die kortikale Lokalisation der Erst- und Zweitsprache bei internaler Satzgenerierung in einer fMRT-Studie beobachtet (Kim et al., 97). Die Probanden mussten in ihrer jeweiligen Erst- und Zweitsprache Sätze generieren bzw. internal beschreiben, was zu bestimmten Zeiten am Tag passiert war. Dabei aktivieren beide Sprachen räumlich distinkte frontale Areale bei Probanden mit spätem Zweitspracherwerb (mittleres Erwerbsalter = 11,2 Jahre), bzw. zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den aktivsten Voxeln von L1 und L2. In temporalen Arealen hingegen finden sich keine Unterschiede. Bei Probanden mit frühem Zweitspracherwerb (beide Sprachen wurden während der frühen Kindheit erworben) zeigen sich weder frontal noch temporal räumliche Unterschiede zwischen der Repräsentation der aktivsten Voxel in L1 und L2. Alle Probanden berichteten ein hohes Leistungsniveau in beiden Sprachen, leider wurde aber nicht publiziert, ob und wie diese Angaben überprüft wurden. Wie bereits oben unter 2.3.2.2 erwähnt, könnte eine Ursache für die unterschiedlichen Ergebnisse der Studien die verschiedenen verwendeten Aufgaben, Stimuli oder ein unterschiedliches Leistungsniveau der Probanden sein. Während Kim und Kollegen (Kim et al., 97) eine inhomogene Gruppe verschiedener Sprachkombinationen untersuchten und die Erhebung des Leistungsniveaus nicht näher spezifizierten, wurden von Chee und Kollegen (Chee et al., 99) chinesisch-englischsprachige Probanden aus Singapur untersucht, bei denen von einem sehr hohen Leistungsniveau ausgegangen werden kann, da sie in einer stark integrierten zweisprachigen Gesellschaft leben. Es ist also möglich, dass eher das Leistungsniveau als das Erwerbsalter für die Determination der neuronalen Organisation von L1 und L2 in der Studie von Kim und Kollegen verantwortlich ist. Eine weitere Kritik an dieser Studie ist, dass die Abstände der Aktivierungsmaxima beider Sprachen ausgemessen wurden. Gerade bei einer großflächigen Aktivierung ist es aber sehr schwer, das Maximum überhaupt zu bestimmen, da fraglich ist, ob das Maximum dem Mittelpunkt der aktivierten Fläche oder dem Punkt mit der größten Änderung des BOLD-Signals (dem am stärksten aktivierten Voxel) entspricht. Außerdem bleibt fraglich, ob das Aktivierungsmaximum wirklich die „wichtigste“ Stelle der Aktivierung ist, oder ob es nicht eher die Größe der räumlichen Ausdehnung der Aktivierung über verschiedene Areale hinweg ist, welche die zugrundeliegende neuronale Aktivierung am

besten widerspiegelt. In der vorliegenden Studie wurde gänzlich auf die Bestimmung der Lokalisationsunterschiede der Aktivierungsmaxima verzichtet, da es nicht möglich war, diese bei so großen und arealumfassenden Aktivierungen festzulegen, insbesondere bei der LALP-Gruppe mit den am weitesten ausgebreiteten und größten Aktivierungen. Insofern ist ein direkter Vergleich zu der Studie von Kim und Kollegen (Kim et al., 97) nicht möglich.

### **5.2.2      Der Einfluss des Erwerbsalters auf die grammatikalische Verarbeitung**

Im Gegensatz zur Semantik zeigte sich während der grammatikalischen Verarbeitung ein signifikanter Aktivierungsunterschied zwischen der EAHP- und LAHP-Gruppe und somit ein aufgabenspezifischer Effekt des Erwerbsalters auf die grammatikalische Verarbeitung. Damit weisen die vorliegenden Daten darauf hin, dass es bei der Frage nach dem Einfluss des Erwerbsalters im wesentlichen auf das Sprachsystem ankommt, welches untersucht wird. Die Gruppe mit spätem Spracherwerb zeigte trotz gleicher Verhaltensleistungen eine größere Aktivierung als die zweisprachig aufgewachsenen Probanden in Arealen, die mit morphosyntaktischer Verarbeitung assoziiert sind (Dapretto und Bookheimer, 99; Moro et al., 01). Das heißt, obwohl sich die beiden Gruppen in sämtlichen Verhaltensdaten nicht voneinander unterschieden (siehe Tabelle 7 unter 4.1), zeigte die Gruppe mit spätem Zweitspracherwerb eine signifikant größere zerebrale Aktivierung.

Beim Vergleich von L2 und L1 innerhalb der Gruppen zeigten sich in der EAHP-Gruppe keine Unterschiede, die LAHP-Gruppe zeigte eine größere Aktivierung von L2 u.a. im Broca Areal. Innerhalb der LAHP-Gruppe zeigte sich allerdings auch eine schlechtere Verhaltensleistung in L2 verglichen mit L1. Dies weist darauf hin, dass neben dem Effekt des Erwerbsalters auch geringe Unterschiede im Leistungsniveau für die unterschiedlichen Aktivierungsmuster verantwortlich sein könnten.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Erwerbsalter das zerebrale Aktivierungsmuster während der Verarbeitung der Grammatik stärker beeinflusst als das Leistungsniveau (im Sinne von mehr Aktivierung oder weniger effizienter Repräsentation, wenn die Sprache spät gelernt wurde). Der aufgabenspezifische Effekt des Erwerbsalters ist bemerkenswert, da bisherige Studien sehr konträre Befunde zur Rolle des Erwerbsalters aufweisen.

Wie oben unter 2.3.1 bereits erwähnt, fanden Weber-Fox und Neville mittels elektrophysiologischer Messungen und der Erhebung von Verhaltensdaten ebenfalls, dass das

grammatikalische Verarbeiten stärker vom Erwerbsalter beeinflusst ist als semantische Verarbeitungsprozesse. Die Aufgabe der chinesisch-englischsprachigen Probanden bestand darin, visuell präsentierte Sätze hinsichtlich ihrer semantischen und grammatikalischen Korrektheit zu beurteilen. Es zeigt sich, dass bereits ein Erwerbsalter über dem dritten Lebensjahr einen Einfluss auf die grammatikalische Verarbeitung, bzw. die entsprechenden Verhaltensdaten und ERP-Komponenten hatte. Die Probanden machen bei den grammatikalischen Aufgaben signifikant mehr Fehler als Probanden mit früherem (0.-3. Lebensjahr) Zweitspracherwerb bzw. Muttersprachler und ihre ERP-Komponenten sind verändert. Hingegen ist das semantische Verarbeiten erst durch ein Erwerbsalter über dem elften Lebensjahr beeinflusst, bzw. zeigen sich nur bei Probanden mit einem Zweitspracherwerb nach dem elften Lebensjahr Leistungsdefizite und veränderte ERP-Komponenten (Weber-Fox und Neville, 96). Bereits 1992 konnte von Neville und Kollegen (Neville et al., 92) gezeigt werden, dass die ERP-Komponenten normalgesunder und gehörloser Probanden sich bei semantischen Verarbeitungsprozessen (Inhaltswörter) nicht voneinander unterscheiden. Bei grammatikalischen Verarbeitungsprozessen (Funktionswörter, die von Gehörlosen später erworben werden) sind sie jedoch unterschiedlich. Dies weist darauf hin, dass grammatikalische und semantische Prozesse verschiedene neuronale Korrelate haben und diese wiederum unterschiedlichen sensitiven Perioden unterstehen. In einer neueren Studie konnte auch auf Wortebene (Inhaltswörter vs. Funktionswörter) gezeigt werden, dass die ERP-Latenzen bei der grammatikalischen Verarbeitung bei bilingualen Probanden mit einem Zweitspracherwerb nach dem siebenten Lebensjahr verändert sind. Bei der semantischen Verarbeitung der Inhaltswörter zeigen Probanden mit einem Zweitspracherwerb vor dem elften Lebensjahr keine veränderten ERP-Komponenten (Weber-Fox und Neville, 01).

Diese Studien geben erste experimentelle Evidenzen dafür, dass die Sprachsysteme Semantik und Grammatik verschiedenen sensitiven oder kritischen Perioden unterliegen. In der hier vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, in welchen Hirnarealen diese beiden Systeme bei unterschiedlichem Spracherwerbsalter und unterschiedlichem Leistungsniveau repräsentiert sind. Allerdings ist erneut darauf hinzuweisen, dass in der vorliegenden Studie nur ein Erwerbsalter von 0 bzw. im Mittel 19 Jahren untersucht wurde. Damit können keine Aussagen über Anfangs- und Endpunkt der kritischen Periode gemacht werden. Um dies zu erreichen, müssten verschiedene Erwerbsalter systematisch untersucht werden.

Vorteil der fMRT gegenüber elektrophysiologischen Maßen ist die wesentlich bessere räumliche Auflösung und die Möglichkeit, auch tiefere Hirnstrukturen zu untersuchen. Ein Nachteil ist, dass die neuronale Aktivität nur indirekt über die Änderungen der Konzentration an

deoxygeniertem Hämoglobin bestimmt wird (siehe Kapitel zur neurovaskulären Kopplung unter 3.1). Mit EEG/ERP hingegen werden direkt die elektrophysiologischen Veränderungen von Zellpopulationen durch Ableitung über der Schädeldecke bestimmt. Dadurch wird eine wesentlich bessere zeitliche Auflösung im Millisekundenbereich erreicht. Allerdings können über die neuronale Aktivität tiefer gelegener Strukturen kaum Aussagen gemacht werden bzw. ist die räumliche Zuordnung der Quellen der Aktivierung, also der zugrundeliegenden Hirnareale, nur sehr grob möglich.

### **5.2.3 Der Zusammenhang von Leistungsniveau und Erwerbsalter**

Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass die beiden hier untersuchten Variablen Leistungsniveau und Erwerbsalter vollkommen voneinander unabhängig sind. Es besteht – geradezu natürlicherweise – ein Zusammenhang zwischen frühem Alter bei Zweitspracherwerb und einem hohen Leistungsniveau. Denn einerseits beeinflusst die Zeitspanne, in der man lernt, die Anzahl der möglichen Wiederholungen und Verknüpfungen des Gelernten an bereits vorhandenes Wissen. Dies geht nicht nur beim Spracherwerb, sondern auch bei anderen gelernten Verhaltensweisen mit verbesserter Verhaltensleistung einher. Ein früheres Erwerbsalter vergrößert in aller Regel die kumulierte Zeit, in der man der Sprache ausgesetzt ist (Expositionsdauer). Andererseits wird eine Sprache bei frühem Erwerbsalter implizit oder informell gelernt, wohingegen ein späterer Spracherwerb in der Regel explizit und formell stattfindet, insbesondere wenn man die Zweitsprache in der Schule erwirbt. Auch die Art des Lernens kann sich auf das Leistungsniveau auswirken. Bei den hier untersuchten Gruppen zeigten sich im Leistungsniveau definitionsgemäß signifikante Unterschiede zwischen der LALP- und der LAHP-Gruppe (siehe Tabelle 6 und Abbildung 8), im Erwerbsalter hingegen gab es keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen. Im Hinblick auf die kritische Periode beim Zweitspracherwerb sollte darauf hingewiesen sein, dass alle Probanden mit spätem Zweitspracherwerb diese nach der eventuell kritischen Periode von 6 Jahren erworben haben. Die EAHP- und LAHP-Gruppe unterscheiden sich im Erwerbsalter, jedoch nicht im Leistungsniveau (Genauigkeit, Reaktionszeit und Leistungsniveau), ein Unterschied wurde hier nur auf funktionell zerebraler Ebene gefunden. Bezüglich möglicher Deckeneffekte der verwendeten Tests, die für die mangelnden Unterschiede in der EAHP-Gruppe oder zwischen den beiden Gruppen mit hohem Leistungsniveau verantwortlich sein könnten, ist darauf



hinzuweisen, dass keiner der Probanden eine bessere Leistung als 91% im detaillierten Sprachtest zeigte.

### 5.3 Einordnung in aktuelle Modelle der Zweitsprache

Wie lassen sich die Ergebnisse dieser Studie in aktuelle Modelle der Zweitsprache einordnen? Im abschließenden Abschnitt dieser Arbeit wird basierend auf bisherigen Modellen und Befunden zu Entwicklung und Lokalisation der Sprache und den Ergebnissen der vorliegenden Studie ein aktualisiertes Modell des Zweitspracherwerbs entwickelt. Im ersten Teil werden die Ergebnisse dieser Untersuchung mit aktuellen Vorhersagen von Modellen verglichen, nach denen jeweils das *Leistungsniveau*, das *Erwerbsalter*, das *Sprachsystem* (Semantik vs. Grammatik) oder das zugrundeliegende *Lern- und Gedächtnissystem* (implizites vs. explizites Lernen) der entscheidende Faktor für die Repräsentation der Zweitsprache ist.

Einige Autoren favorisieren die Hypothese, dass das *Sprachleistungsniveau* die Hauptdeterminante der zerebralen Organisation der Zweitsprache ist. Eine aktive Aufgabe sollte in der schlechter beherrschten Zweitsprache zu größeren Aktivierungen führen als in der gut beherrschte Erstsprache (Chee et al., 99; Chee et al., 01; Luke et al., 02). Es ist intuitiv ersichtlich, dass das Lösen einer schwierigeren Aufgabe mehr Aufmerksamkeit und mehr Anstrengung verlangt, als das Bearbeiten einer sehr einfachen Aufgabe. Diese erhöhte Anstrengung scheint sich auch neuronal abzubilden: Innerhalb der Gruppe mit spätem Spracherwerb und niedrigem Leistungsniveau führte die Zweitsprache dementsprechend zu größeren Aktivierungen als die früh erworbene Erstsprache. Kontrolliert man jedoch das Spracherwerbsalter, zeigte sich der Effekt des Leistungsniveaus insbesondere während der semantischen Aufgabe: Die Gruppe mit niedrigerem Leistungsniveau zeigte größere Aktivierungen während der semantischen Aufgabe in der Zweitsprache als die Probanden mit hohem Leistungsniveau. Bei der grammatikalischen Aufgabe jedoch zeigte die Gruppe mit niedrigem Leistungsniveau keine größeren Aktivierungen als die Gruppe mit hohem Leistungsniveau. Dies kann dadurch erklärt werden, dass auch letztere Probanden trotz eines sehr hohen Sprachleistungsniveaus eine signifikant stärkere Aktivierung während der grammatikalischen Aufgabe der Zweitsprache zeigten.

Dies wiederum muss auf den *Einfluss des Spracherwerbsalters* zurückgeführt werden. Wenn die zerebrale Repräsentation der Zweitsprache vom Spracherwerbsalter abhängig ist, sollte die spät erworbene Zweitsprache anders repräsentiert sein als die früh erworbene Erstsprache (Kim et al., 97). In der vorliegenden Untersuchung fand sich ein solches Muster lediglich während der

grammatikalischen Aufgabe. Die Probanden mit spätem Zweitspracherwerb wiesen trotz vergleichbaren Leistungsniveaus größere Aktivierungen auf als die Probanden, welche beide Sprachen seit der Geburt erlernt hatten. Während der semantischen Aufgabe unterschieden sich diese beiden Gruppen nicht voneinander.

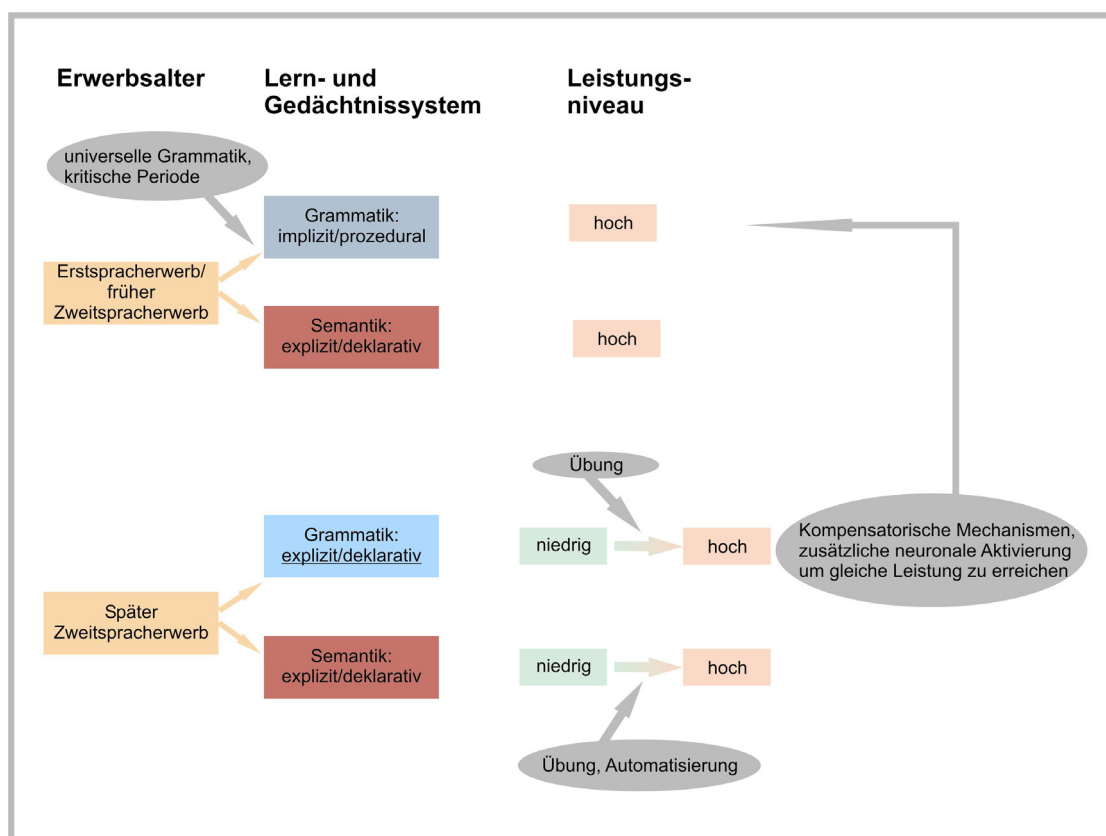
Was aber macht den *Unterschied zwischen Semantik und Grammatik* aus? Chomsky postuliert mit dem Konzept der angeborenen universellen Grammatik, dass es Erwerbs- und Entwicklungsunterschiede von semantischem und grammatikalischem Wissen gibt (Chomsky, 80; Pinker, 94). Entsprechend dieser Annahmen sollten diese beiden Prozesse auch zerebral unterschiedlich repräsentiert sein und das Spracherwerbsalter sollte insbesondere auf grammatikalische Prozesse Einfluss haben (vergleiche auch (Weber-Fox und Neville, 96; DeKeyser, 00; Weber-Fox und Neville, 01)). Die Ergebnisse der vorliegenden Studie entsprechen diesen Annahmen. Das Alter beim Zweitspracherwerb hatte einen Einfluss auf die kortikale Repräsentation grammatikalischer, nicht aber semantischer Prozesse. Wie unter 2.1.1 beschrieben, zeigen sich Unterschiede der zeitlichen Verarbeitung und räumlichen Repräsentation von Grammatik und Semantik auch bei monolingualen Probanden.

Eine Ursache dafür, dass sich Grammatik und Semantik in ihrer Entwicklung, der zeitlichen Verarbeitung und räumlichen zerebralen Repräsentation voneinander unterscheiden, könnte darin bestehen, dass grammatikalisches und semantisches Wissen auf *unterschiedlichen Lernmechanismen und Gedächtnissystemen* basieren. Einige Autoren versuchen, aktuelle Gedächtnis- und Sprachmodelle miteinander zu verbinden (Paradis, 94; Ullman et al., 97; Ullman, 01a; Ullman, 01b; Lebrun, 02). Dabei wird angenommen, dass bei frühem („normalem“) Spracherwerb die Grammatik implizit/prozedural, die Semantik hingegen aber explizit/deklarativ erworben und verarbeitet wird. Darüber hinaus werden folgende spezifische Vorhersagen gemacht, wie diese differentiellen Prozesse beim späten Zweitspracherwerb zum Tragen kommen. Es wird postuliert, dass es beim Erwerb und der Verarbeitung der Grammatik mit zunehmendem Alter bzw. geringerem Leistungsniveau zu einer größeren Beteiligung des explizit/deklarativen Systems kommt (Ullman, 01c). D.h. eine Sprache, die spät erworben und nur mit niedrigem Leistungsniveau beherrscht wird, muss in ihrer Gesamtheit (Semantik und Grammatik) im explizit/deklarativen System verarbeitet werden, da es keine impliziten Regeln im prozeduralen Gedächtnissystem gibt, auf die zurückgegriffen werden kann. Zudem wird ein stärkerer Einfluss des Spracherwerbsalters auf die Grammatik vorhergesagt. Mit anderen Worten sollten sich Probanden mit unterschiedlichem Spracherwerbsalter bei semantischen Prozessen nicht voneinander unterscheiden, bei der Verarbeitung komplexer grammatikalischer Prozesse jedoch sollte es einen Unterschied in der neuronalen Repräsentation geben. Die in der

vorliegenden Studie gefundenen Aktivierungsmuster der drei untersuchten Gruppen entsprechen weitestgehend diesen Annahmen. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass hier die Sätze *explizit* hinsichtlich ihrer Richtigkeit/Sinnhaftigkeit beurteilt wurden. Es können daher keine Aussagen zum Ausmaß der prozeduralen oder deklarativen Verarbeitung der Sätze gemacht werden. Eine Studie von Naoko Tomioka (Vortrag „How to Distinguish Procedural and Declarative Memory Use in L2: Processing with a Behavioral Test“ beim Meeting der International Linguistic Association, 2002, York University Toronto) zeigt, dass Grammatikalitätsurteile nicht geeignet sind, um den Grad an implizit/prozeduralen oder explizit/deklarativen Verarbeitungsprozessen zu bestimmen. Ein weitaus besseres Maß ist die Fehleranalyse bei der Wiedergabe langer Sätze. Bei dieser Aufgabe machen zweisprachige Probanden mehr Fehler als bei der reinen Beurteilung der Grammatikalität der Sätze. Anhand der produzierten Fehlerrate konnte mit diesem Test der Grad an explizit/deklarativem Verarbeiten bestimmt werden. Meines Erachtens ist aber bisher kein experimentelles Paradigma entwickelt worden, bei dem man explizite und implizite sprachliche Prozesse sicher voneinander trennen könnte. Für die Verifizierung der o.g. Modelle wäre dies ein nächster logischer Schritt.

### 5.3.1 Ein aktualisiertes Modell des Zweitspracherwerbs

Im Folgenden werden die oben genannten Modelle und Befunde und die Ergebnisse der vorliegenden Studie zu einem aktualisierten Modell des Zweitspracherwerbs kombiniert. Dieses Modell ist schematisch in Abbildung 13 dargestellt.



**Abbildung 13.**

**Schematisches Modell des Zweitspracherwerbs. Erläuterungen im folgenden Text.**

Wenn eine Zweitsprache sehr *früh* erworben wird, kann das grammatikalische Regelwerk auf Grund der universellen Grammatik implizit/prozedural erworben werden (implizite linguistische Kompetenz). Die universelle Grammatik wird mit den sprachspezifischen Parametern beider Sprachen gefüllt und leitet den effizienten Grammatikerwerb. Semantisches Wissen wird explizit/deklarativ erworben. Bei Probanden mit frühem Zweitspracherwerb und hohem Leistungsniveau sollte sich demnach die zerebrale Repräsentation beider Sprachen nicht voneinander unterscheiden, weder während grammatikalischer noch semantischer Aufgaben.

Wird eine zweite Sprache jedoch erst *später* erworben, d.h. nach der kritischen Periode, in der die universelle Grammatik den effizienten implizit/prozeduralen Erwerb leitet, wird die Grammatik der Zweitsprache explizit/deklarativ und mit Hilfe des vorhandenen Wissens der Erstsprache erlernt (explizites linguistisches Wissen). Semantisches Wissen wird explizit/deklarativ und oft auf abstraktem Weg erworben, d.h. man lernt nicht am konkreten Objekt wie ein Kind, sondern man lernt, die Begriffe der Erstsprache in die Zweitsprache zu übersetzen. Obwohl auch die Probanden mit spätem Zweitspracherwerb bei genügend Übung ein vergleichbares *Sprachleistungsniveau* in der Zweitsprache erreichen können wie zweisprachig aufgewachsene Probanden, sollten sich zerebrale Repräsentationsunterschiede während grammatikalischer Verarbeitungsprozesse zeigen, da diese durch unterschiedliche Mechanismen entweder explizit/deklarativ erlernt oder implizit/prozedural erworben wurden. Bei semantischen Prozessen sollten sich die zerebralen Repräsentationen beider Gruppen ähneln, da beide das semantische Wissen explizit/deklarativ erworben haben.

Wird eine zweite Sprache spät erlernt, aber nur ein *niedriges Leistungsniveau* erreicht, können sich auch bei semantischen Prozessen unterschiedliche Repräsentationen zeigen. In der Zweitsprache muss die Bedeutung mancher Wörter aktiv hergeleitet oder erschlossen werden, was mit gesteigerter Aufgabenschwierigkeit und damit neuronaler Aktivierung einhergehen sollte.

Zusammenfassend zeigt die vorliegende Untersuchung diesem Modell entsprechend, dass das Leistungsniveau einen stärkeren Einfluss auf die Verarbeitung der Semantik in der spät erworbenen Zweitsprache hat wohingegen das Spracherwerbsalter einen stärkeren Einfluss auf die Repräsentation der grammatikalischen Verarbeitung hat. In Zusammenschau mit den Ergebnissen von Weber-Fox und Neville (Weber-Fox und Neville, 96) unterstützen die Befunde die Hypothese, dass die Parameter für die zerebrale Repräsentation der Grammatik in einer kritischen Periode innerhalb der ersten Lebensjahre gesetzt werden, und dass dies mit unterschiedlichen hochspezifischen Aktivierungsmustern assoziiert ist. Dies gilt nicht für die semantische Verarbeitung, bei der die unterschiedlichen Aktivierungsmuster in Gruppen mit spätem Zweitspracherwerb hauptsächlich vom erworbenen Grad des Leistungsniveaus abhängig waren. Das Alter des Spracherwerbs spielte hierbei keine so starke Rolle. Mit anderen Worten scheinen die ersten Lebensjahre insbesondere für den Grammatikerwerb eine kritische Phase darzustellen.

## 6 Zusammenfassung

Erwachsenen fällt der Erwerb einer Sprache schwerer als Kindern. Bei der Entwicklung der Sprache wird vielfach von einer kritischen oder sensiblen Phase innerhalb der ersten Lebensjahre ausgegangen. Dem Kleinkind soll ein angeborener Mechanismus in Form einer universellen Grammatik zur Verfügung stehen, der die Grundlage für einen effizienten Grammatikerwerb darstellt. Innerhalb der kritischen Phase muss die universelle Grammatik mit den sprachspezifischen Parametern gefüllt werden. Klinische und experimentelle Befunde weisen darauf hin, dass es Unterschiede in der Entwicklung, der Repräsentation und der Verarbeitung von Semantik und Grammatik gibt.

Welchen Einfluss das Spracherwerbsalter auf die kortikale Repräsentation und Verarbeitung der Semantik und Grammatik hat, kann anhand des Bilingualismusmodells überprüft werden. Bisherige Studien zeigen, dass neben dem Alter bei Zweitspracherwerb auch das Sprachleistungsniveau in der Zweitsprache einen Einfluss auf deren kortikale Repräsentation hat. Allerdings führten sowohl Verhaltensuntersuchungen als auch funktionell bildgebende Studien bislang zu widersprüchlichen Ergebnissen.

In der vorliegenden Studie wurde mittels funktioneller Magnetresonanztomographie überprüft, ob die Faktoren Alter bei Zweitspracherwerb und Sprachleistungsniveau einen differentiellen Einfluss auf die kortikale Repräsentation grammatikalischer und semantischer Verarbeitungsprozesse in der Zweitsprache haben. Dafür wurden drei italienisch-deutschsprachige Probandengruppen mit unterschiedlichem Spracherwerbsalter und Leistungsniveau der Zweitsprache untersucht: (a) eine Gruppe mit frühem Spracherwerbsalter und hohem Leistungsniveau, (b) eine Gruppe mit spätem Spracherwerbsalter und hohem Leistungsniveau und (c) eine Gruppe mit spätem Spracherwerbsalter und niedrigem Leistungsniveau. Die Probanden beurteilten die grammatikalische oder semantische Korrektheit visuell präsentierter Sätze der Erst- und Zweitsprache. In den Gruppen mit spätem Zweitspracherwerb zeigten Probanden mit niedrigem Leistungsniveau größere kortikale Aktivierungen als Probanden mit hohem Leistungsniveau während der semantischen, nicht jedoch während der grammatikalischen Aufgabe. Die beiden Gruppen mit hohem Leistungsniveau aber unterschiedlichem Sprach-

erwerbsalter zeigten keine unterschiedlichen Aktivierungen in der semantischen Aufgabe. Bei der grammatikalischen Aufgabe hingegen zeigte die Gruppe mit hohem Leistungsniveau aber spätem Zweitspracherwerb größere Aktivierungen in der Zweitsprache als die Gruppe mit vergleichbar hohem Leistungsniveau aber sehr frühem Zweitspracherwerb.

Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass das Sprachleistungsniveau die Hauptdeterminante der zerebralen Organisation semantischer Prozesse ist. Hingegen hat das Spracherwerbsalter einen aufgabenspezifischen Einfluss auf die zerebrale Organisation grammatikalischer Prozesse. In Übereinstimmung mit neueren klinisch-experimentellen Befunden unterstützen diese Ergebnisse die Annahme einer kritischen Periode beim Zweitspracherwerb. Die ersten Lebensjahre stellen somit insbesondere für den Grammatikerwerb eine kritische Phase dar.



## **Literaturverzeichnis**

- Abutalebi, J.; Cappa, S. F. und Perani, D. (2001): The bilingual brain as revealed by functional neuroimaging., *Bilingualism Lang.Cog.* (Band 4), Seite 179-190.
- Adler, C. M.; Sax, K. W.; Holland, S. K.; Schmithorst, V.; Rosenberg, L. und Strakowski, S. M. (2001): Changes in neuronal activation with increasing attention demand in healthy volunteers: an fMRI study, *Synapse* (Band 42), Nr. 4, Seite 266-272.
- Aglioti, S.; Beltramello, A.; Girardi, F. und Fabbro, F. (1996): Neurolinguistic and follow-up study of an unusual pattern of recovery from bilingual subcortical aphasia, *Brain* (Band 119), Nr. 5, Seite 1551-1564.
- Aglioti, S. und Fabbro, F. (1993): Paradoxical selective recovery in a bilingual aphasic following subcortical lesions, *Neuroreport* (Band 4), Nr. 12, Seite 1359-1362.
- Bandettini, P. A.; Wong, E. C.; Hinks, R. S.; Tikofsky, R. S. und Hyde, J. S. (1992): Time course EPI of human brain function during task activation, *Magn.Reson.Med.* (Band 25), Nr. 2, Seite 390-397.
- Bates, E.; Devescovi, A. und Wulfeck, B. (2001): Psycholinguistics: a cross-language perspective, *Annu.Rev.Psychol.* (Band 52), Seite 369-396.
- Bates, E. und Goodman, J. C (1997): On the inseparability of grammar and the lexicon: evidence from acquisition, aphasia and real-time processing, *Lang.Cognit.Proc.* (Band 12), Nr. 5/6, Seite 507-584.
- Bates, E.; Thal, D.; Trauner, D.; Fenson, J.; Aram, D. und Nass, R. (1997): From first words to grammar in children with focal brain injury. In D. Thal & J. Reilly (Eds.), *Special Issue on Origins of Communicative Disorders*, *Dev.Neuropsychol.* (Band 13), Nr. 3, Seite 275-343.
- Belliveau, J. W.; Kennedy, D. N., Jr.; McKinstry, R. C.; Buchbinder, B. R.; Weisskoff, R. M.; Cohen, M. S.; Vevea, J. M.; Brady, T. J. und Rosen, B. R. (1991): Functional mapping of the human visual cortex by magnetic resonance imaging, *Science* (Band 254), Nr. 5032, Seite 716-719.
- Berker, E. A.; Berker, A. H. und Smith, A. (1986): Translation of Broca's 1865 report. Localization of speech in the third left frontal convolution, *Arch.Neurol.* (Band 43), Nr. 10, Seite 1065-1072.
- Bialystok, E. und Miller, B. (1999): The problem of age in second language acquisition: Influences from language, structure, and task, *Bilingualism Lang.Cog.* (Band 2), Nr. 2, Seite 127-145.
- Binder, J. R.; Frost, J. A.; Hammeke, T. A.; Cox, R. W.; Rao, S. M. und Prieto, T. (1997): Human brain language areas identified by functional magnetic resonance imaging, *J Neurosci.* (Band 17), Nr. 1, Seite 353-362.
- Birdsong, D. und Molis, M. (2001): On the Evidence for Maturational Constraints in Second-Language Acquisition, *J.Mem.Lang.* (Band 44), Nr. 2, Seite 235-249.

- Black, P. M. und Ronner, S. F. (1987): Cortical mapping for defining the limits of tumor resection, *Neurosurgery* (Band 20), Nr. 6, Seite 914-919.
- Boynton, G. M.; Engel, S. A.; Glover, G. H. und Heeger, D. J. (1996): Linear systems analysis of functional magnetic resonance imaging in human V1, *J Neurosci.* (Band 16), Nr. 13, Seite 4207-4221.
- Buxton, R. B. (2002): *Introduction to Functional Magnetic Resonance Imaging: Principles & Techniques: Principles & Techniques*, University Press, Cambridge, ISBN: 0521581133.
- Caplan, D. (1992): *Language: Structure, Processing, and Disorders*, MIT Press, Cambridge, Mass.
- Caplan, D. (2001): The measurement of chance performance in aphasia, with specific reference to the comprehension of semantically reversible passive sentences: a note on issues raised by Caramazza, Capitani, Rey, and Berndt (2001) and Drai, Grodzinsky, and Zurif (2001), *Brain Lang.* (Band 76), Nr. 2, Seite 193-201.
- Caplan, D.; Alpert, N. und Waters, G. (1998): Effects of syntactic structure and propositional number on patterns of regional cerebral blood flow, *J Cogn. Neurosci.* (Band 10), Nr. 4, Seite 541-552.
- Caplan, D.; Alpert, N. und Waters, G. (1999): PET studies of syntactic processing with auditory sentence presentation, *Neuroimage* (Band 9), Nr. 3, Seite 343-351.
- Caplan, D.; Alpert, N.; Waters, G. und Olivieri, A. (2000): Activation of Broca's area by syntactic processing under conditions of concurrent articulation, *Hum. Brain Mapp.* (Band 9), Nr. 2, Seite 65-71.
- Caramazza, A. und Hillis, A. E. (1991): Lexical organization of nouns and verbs in the brain, *Nature* (Band 349), Nr. 6312, Seite 788-790.
- Caramazza, A. und Shelton, J. R. (1998): Domain-specific knowledge systems in the brain the animate-inanimate distinction, *J. Cogn Neurosci.* (Band 10), Nr. 1, Seite 1-34.
- Carpenter, P. A.; Just, M. A.; Keller, T. A.; Eddy, W. F. und Thulborn, K. R. (1999): Time course of fMRI-activation in language and spatial networks during sentence comprehension, *Neuroimage* (Band 10), Nr. 2, Seite 216-224.
- Chee, M. W.; Hon, N.; Lee, H. L. und Soon, C. S. (2001): Relative language proficiency modulates BOLD signal change when bilinguals perform semantic judgments. Blood oxygen level dependent, *Neuroimage* (Band 13), Nr. 6 Pt 1, Seite 1155-1163.
- Chee, M. W.; Tan, E. W. und Thiel, T. (1999): Mandarin and English single word processing studied with functional magnetic resonance imaging, *J Neurosci.* (Band 19), Nr. 8, Seite 3050-3056.
- Chomsky, N. (1980): *Rules and Representations*, Columbia University Press, New York.
- Cohen, M. S. und Bookheimer, S. Y. (1994): Localization of brain function using magnetic resonance imaging, *Trends Neurosci.* (Band 17), Nr. 7, Seite 268-277.
- Curtiss, S. (1977): *Genie. A psycholinguistic study of a modern-day "wild" child*, Academic Press, New York.
- Dapretto, M. und Bookheimer, S. Y. (1999): Form and content: dissociating syntax and semantics in sentence comprehension, *Neuron* (Band 24), Nr. 2, Seite 427-432.
- DeCasper, A. J. und Fifer, W. P. (1980): Of human bonding: newborns prefer their mothers' voices, *Science* (Band 208), Nr. 4448, Seite 1174-1176.

- Dehaene-Lambertz, G. und Baillet, S. (1998): A phonological representation in the infant brain, *Neuroreport* (Band 9), Nr. 8, Seite 1885-1888.
- Dehaene-Lambertz, G. und Dehaene, S. (1994): Speed and cerebral correlates of syllable discrimination in infants, *Nature* (Band 370), Nr. 6487, Seite 292-295.
- Dehaene-Lambertz, G.; Dehaene, S. und Hertz-Pannier, L. (2002): Functional neuroimaging of speech perception in infants, *Science* (Band 298), Nr. 5600, Seite 2013-2015.
- Dehaene-Lambertz, G. und Pena, M. (2001): Electrophysiological evidence for automatic phonetic processing in neonates, *Neuroreport* (Band 12), Nr. 14, Seite 3155-3158.
- Dehaene, S.; Dupoux, E.; Mehler, J.; Cohen, L.; Paulesu, E.; Perani, D.; van de Moortele, P. F.; Lehericy, S. und Le Bihan, D. (1997): Anatomical variability in the cortical representation of first and second language, *Neuroreport* (Band 8), Nr. 17, Seite 3809-3815.
- DeKeyser, R. M. (2000): The robustness of critical period effects in second language acquisition, *Stud.Sec.Lang.Acq.* (Band 22), Seite 499-533.
- Dirnagl, U. (1997): Metabolic aspects of neurovascular coupling, *Adv.Exp.Med.Biol.* (Band 413), Seite 155-159.
- Embick, D.; Marantz, A.; Miyashita, Y.; O'Neil, W. und Sakai, K. L. (2000): A syntactic specialization for Broca's area, *Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A* (Band 97), Nr. 11, Seite 6150-6154.
- Fabbro, F. (2001a): The bilingual brain: bilingual aphasia, *Brain Lang.* (Band 79), Nr. 2, Seite 201-210.
- Fabbro, F. (2001b): The bilingual brain: cerebral representation of languages, *Brain Lang.* (Band 79), Nr. 2, Seite 211-222.
- Feuerbach, A. R. (1832): Kaspar Hauser. Beispiel eines Verbrechens am Seelenleben des Menschen, Dolfuss, Ansbach.
- Finger, S. und Roe, D. (1996): Gustave Dax and the early history of cerebral dominance, *Arch.Neurol.* (Band 53), Nr. 8, Seite 806-813.
- Finger, S. und Roe, D. (1999): Does Gustave Dax deserve to be forgotten? The temporal lobe theory and other contributions of an overlooked figure in the history of language and cerebral dominance, *Brain Lang.* (Band 69), Nr. 1, Seite 16-30.
- Flege, J. E.; MacKay, I. R. und Meador, D. (1999a): Native Italian speakers' perception and production of English vowels, *J Acoust.Soc.Am.* (Band 106), Nr. 5, Seite 2973-2987.
- Flege, J. E.; Munro, M. J. und MacKay, I. R. (1995): Factors affecting strength of perceived foreign accent in a second language, *J Acoust.Soc.Am.* (Band 97), Nr. 5 Pt 1, Seite 3125-3134.
- Flege, J. E.; Schmidt, A. M. und Wharton, G. (1996): Age of learning affects rate-dependent processing of stops in a second language, *Phonetica* (Band 53), Nr. 3, Seite 143-161.
- Flege, J. E.; Yeni-Komshian, G. H. und Liu, S. (1999b): Age Constraints on Second-Language Acquisition., *J Mem.Lang.* (Band 41), Nr. 1, Seite 78-104.
- Frahm, J.; Bruhn, H.; Merboldt, K. D. und Hanicke, W. (1992): Dynamic MR imaging of human brain oxygenation during rest and photic stimulation, *J Magn.Reson.Imaging* (Band 2), Nr. 5, Seite 501-505.

- Friederici, A. D.; Opitz, B. und von Cramon, D. Y. (2000): Segregating semantic and syntactic aspects of processing in the human brain: an fMRI investigation of different word types, *Cereb.Cortex* (Band 10), Nr. 7, Seite 698-705.
- Friederici, A. D.; Steinhauer, K. und Frisch, S. (1999): Lexical integration: sequential effects of syntactic and semantic information, *Mem.Cognit.* (Band 27), Nr. 3, Seite 438-453.
- Friedman, L.; Kenny, J. T.; Wise, A. L.; Wu, D.; Stuve, T. A.; Miller, D. A.; Jesberger, J. A. und Lewin, J. S. (1998): Brain activation during silent word generation evaluated with functional MRI, *Brain Lang.* (Band 64), Nr. 2, Seite 231-256.
- Friston, K.; Holmes, A. P.; Worsley, K.; Poline, J. B.; Frith, C. und Frackowiak, R. S. (1995): Statistical parametric maps in functional imaging: a general linear approach, *Hum.Brain Mapp.* (Band 2), Seite 189-210.
- Friston, K. J.; Holmes, A. P.; Price, C. J.; Buchel, C. und Worsley, K. J. (1999): Multisubject fMRI studies and conjunction analyses, *Neuroimage* (Band 10), Nr. 4, Seite 385-396.
- Gomez-Tortosa, E.; Martin, E. M.; Gaviria, M.; Charbel, F. und Ausman, J. I. (1995): Selective deficit of one language in a bilingual patient following surgery in the left perisylvian area, *Brain Lang.* (Band 48), Nr. 3, Seite 320-325.
- Grimshaw, G. M.; Adelstein, A.; Bryden, M. P. und MacKinnon, G. E. (1998): First-language acquisition in adolescence: evidence for a critical period for verbal language development, *Brain Lang.* (Band 63), Nr. 2, Seite 237-255.
- Grodzinsky, Y. und Finkel, L. (1998): The neurology of empty categories aphasics' failure to detect ungrammaticality, *J Cogn.Neurosci.* (Band 10), Nr. 2, Seite 281-292.
- Gunter, T. C.; Friederici, A. D. und Schriefers, H. (2000): Syntactic gender and semantic expectancy: ERPs reveal early autonomy and late interaction, *J Cogn.Neurosci.* (Band 12), Nr. 4, Seite 556-568.
- Hahne, A. und Friederici, A. D. (1999): Electrophysiological evidence for two steps in syntactic analysis. Early automatic and late controlled processes, *J Cogn.Neurosci.* (Band 11), Nr. 2, Seite 194-205.
- Hahne, A. und Friederici, A. D. (2002): Differential task effects on semantic and syntactic processes as revealed by ERPs, *Brain Res.Cogn.Brain Res.* (Band 13), Nr. 3, Seite 339-356.
- Hasegawa, M.; Carpenter, P. A. und Just, M. A. (2002): An fMRI study of bilingual sentence comprehension and workload, *Neuroimage.* (Band 15), Nr. 3, Seite 647-660.
- Hauser, M. D.; Chomsky, N. und Fitch, W. T. (2002): The faculty of language: what is it, who has it, and how did it evolve?, *Science* (Band 298), Nr. 5598, Seite 1569-1579.
- Heeger, D. J. und Ress, D. (2002): What does fMRI tell us about neuronal activity?, *Nat.Rev.Neurosci.* (Band 3), Nr. 2, Seite 142-151.
- Hiscock, M. (1998): Brain lateralization across the life span, Stemmer, E. und Whitaker, H. A., *Handbook of Neurolinguistics*, 1. Auflage, Seite 357-368, Academic Press, San Diego.
- Holmes, A. P. und Friston, K. J. (1998): Generalizability, random effects, and population inference., *Neuroimage* (Band 7), Seite S754.
- Holowka, S. und Petitto, L. A. (2002): Left hemisphere cerebral specialization for babies while babbling, *Science* (Band 297), Nr. 5586, Seite 1515.

- Howard, D und Patterson, K. (1992): The Pyramid and Palm Trees Test: A Test of Semantic Access from Words and Pictures, Thames Valley Test Co., Bury St. Edmunds.
- Hund-Georgiadis, M.; Lex, U. und von Cramon, D. Y. (2001): Language dominance assessment by means of fMRI: contributions from task design, performance, and stimulus modality, *J Magn.Reson.Imaging* (Band 13), Nr. 5, Seite 668-675.
- Hurford, J. R. (1991): The evolution of the critical period for language acquisition, *Cognition* (Band 40), Nr. 3, Seite 159-201.
- Indefrey, P.; Hagoort, P.; Herzog, H.; Seitz, R. J. und Brown, C. M. (2001): Syntactic processing in left prefrontal cortex is independent of lexical meaning, *Neuroimage* (Band 14), Nr. 3, Seite 546-555.
- Johnson, J. S. und Newport, E. L. (1989): Critical period effects in second language learning: the influence of maturational state on the acquisition of English as a second language, *Cognit.Psychol.* (Band 21), Nr. 1, Seite 60-99.
- Johnson, J. S. und Newport, E. L. (1991): Critical period effects on universal properties of language: the status of subadjacency in the acquisition of a second language, *Cognition* (Band 39), Nr. 3, Seite 215-258.
- Joynt, R. J. und Benton, A. L. (1964): The memoir of Marc Dax on aphasia., *Neurology* (Band 14), Seite 851-854.
- Just, M. A.; Carpenter, P. A.; Keller, T. A.; Eddy, W. F. und Thulborn, K. R. (1996): Brain activation modulated by sentence comprehension, *Science* (Band 274), Nr. 5284, Seite 114-116.
- Kang, A. M.; Constable, R. T.; Gore, J. C. und Avrutin, S. (1999): An event-related fMRI study of implicit phrase-level syntactic and semantic processing, *Neuroimage* (Band 10), Nr. 5, Seite 555-561.
- Kastner, S. und Ungerleider, L. G. (2000): Mechanisms of visual attention in the human cortex, *Annu.Rev.Neurosci.* (Band 23), Seite 315-341.
- Kim, K. H.; Relkin, N. R.; Lee, K. M. und Hirsch, J. (1997): Distinct cortical areas associated with native and second languages, *Nature* (Band 388), Nr. 6638, Seite 171-174.
- Komarova, N. L.; Niyogi, P. und Nowak, M. A. (2001): The evolutionary dynamics of grammar acquisition, *J Theor.Biol.* (Band 209), Nr. 1, Seite 43-59.
- Komarova, N. L. und Nowak, M. A. (2001): Natural selection of the critical period for language acquisition, *Proc.R.Soc.Lond.B.Biol.Sci.* (Band 268), Nr. 1472, Seite 1189-1196.
- Kral, A.; Hartmann, R.; Tillein, J.; Heid, S. und Klinke, R. (2001): Delayed maturation and sensitive periods in the auditory cortex, *Audiol.Neurotol.* (Band 6), Nr. 6, Seite 346-362.
- Kwong, K. K. (1995): Functional magnetic resonance imaging with echo planar imaging, *Magn Reson.Q.* (Band 11), Nr. 1, Seite 1-20.
- Kwong, K. K.; Belliveau, J. W.; Chesler, D. A.; Goldberg, I. E.; Weisskoff, R. M.; Poncelet, B. P.; Kennedy, D. N.; Hoppel, B. E.; Cohen, M. S.; Turner, R. und . (1992): Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation, *Proc.Natl.Acad.Sci U.S.A* (Band 89), Nr. 12, Seite 5675-5679.
- Lebrun, Y. (1978): Evaluation of language-impaired children, Peng, F. und Von Raffler-Engel, W., *Language acquisition and developmental kinesics* , Seite 182-193, Bunka Hyoron, Hiroshima.

- Lebrun, Y. (1980): Victor of Aveyron: A reappraisal in light of more recent cases of feral speech, *Lang.Sciences* (Band 2), Nr. 1, Seite 32-43.
- Lebrun, Y. (2002): Implicit competence and explicit knowledge, Fabbro, F., *Advances in the neurolinguistics of bilingualism*, Seite 299-313, Forum, Udine.
- Lenneberg, E. H. (1967): *Biological foundations of language*, John Wiley and Sons, New York.
- Lind, K. und Wermke, K. (2002): Development of the vocal fundamental frequency of spontaneous cries during the first 3 months, *Int.J.Pediatr.Otorhinolaryngol.* (Band 64), Nr. 2, Seite 97-104.
- Logothetis, N. K. (2002): The neural basis of the blood-oxygen-level-dependent functional magnetic resonance imaging signal, *Philos.Trans.R.Soc.Lond B Biol.Sci.* (Band 357), Nr. 1424, Seite 1003-1037.
- Logothetis, N. K.; Pauls, J.; Augath, M.; Trinath, T. und Oeltermann, A. (2001): Neurophysiological investigation of the basis of the fMRI signal, *Nature* (Band 412), Nr. 6843, Seite 150-157.
- Luke, K. K.; Liu, H. L.; Wai, Y. Y.; Wan, Y. L. und Tan, L. H. (2002): Functional anatomy of syntactic and semantic processing in language comprehension, *Hum.Brain Mapp.* (Band 16), Nr. 3, Seite 133-145.
- Mayo, L. H.; Florentine, M. und Buus, S. (1997): Age of second-language acquisition and perception of speech in noise, *J Speech Lang.Hear.Res.* (Band 40), Nr. 3, Seite 686-693.
- Menon, R. S.; Ogawa, S.; Kim, S. G.; Ellermann, J. M.; Merkle, H.; Tank, D. W. und Ugurbil, K. (1992): Functional brain mapping using magnetic resonance imaging. Signal changes accompanying visual stimulation, *Invest Radiol.* (Band 27 Suppl 2), Seite S47-S53.
- Miller, J. W.; Dodrill, C. B.; Born, D. E. und Ojemann, G. A. (2003): Atypical speech is rare in individuals with normal developmental histories, *Neurology* (Band 60), Nr. 6, Seite 1042-1044.
- Moonen, C. T. W. und Bandettini, P. A. (1999): *Functional MRI*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Moro, A.; Tettamanti, M.; Perani, D.; Donati, C.; Cappa, S. F. und Fazio, F. (2001): Syntax and the brain: disentangling grammar by selective anomalies, *Neuroimage* (Band 13), Nr. 1, Seite 110-118.
- Naeser, M. A. und Hayward, R. W. (1978): Lesion localization in aphasia with cranial computed tomography and the Boston Diagnostic Aphasia Exam, *Neurology* (Band 28), Nr. 6, Seite 545-551.
- Neville, H. J.; Mills, D. L. und Lawson, D. S. (1992): Fractionating language: different neural subsystems with different sensitive periods, *Cereb.Cortex* (Band 2), Nr. 3, Seite 244-258.
- Newman, A. J.; Pancheva, R.; Ozawa, K.; Neville, H. J. und Ullman, M. T. (2001): An event-related fMRI study of syntactic and semantic violations, *J Psycholinguist.Res.* (Band 30), Nr. 3, Seite 339-364.
- Ni, W.; Constable, R. T.; Mencl, W. E.; Pugh, K. R.; Fulbright, R. K.; Shaywitz, S. E.; Shaywitz, B. A.; Gore, J. C. und Shankweiler, D. (2000): An event-related neuroimaging study distinguishing form and content in sentence processing, *J Cogn.Neurosci.* (Band 12), Nr. 1, Seite 120-133.
- Nowak, M. A.; Komarova, N. L. und Niyogi, P. (2001): Evolution of universal grammar, *Science* (Band 291), Nr. 5501, Seite 114-118.
- Nowak, M. A.; Komarova, N. L. und Niyogi, P. (2002): Computational and evolutionary aspects of language, *Nature* (Band 417), Nr. 6889, Seite 611-617.

- Obrig, H. und Villringer, A. (2003): Beyond the visible--imaging the human brain with light, *J.Cereb.Blood Flow Metab* (Band 23), Nr. 1, Seite 1-18.
- Ogawa, S.; Lee, T. M.; Kay, A. R. und Tank, D. W. (1990): Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation, *Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A* (Band 87), Nr. 24, Seite 9868-9872.
- Ogawa, S.; Tank, D. W.; Menon, R.; Ellermann, J. M.; Kim, S. G.; Merkle, H. und Ugurbil, K. (1992): Intrinsic signal changes accompanying sensory stimulation: functional brain mapping with magnetic resonance imaging, *Proc.Natl.Acad.Sci U.S.A* (Band 89), Nr. 13, Seite 5951-5955.
- Ojemann, G. A. (1983): Brain organization for language from the perspective of electrical stimulation mapping, *Behav.Brain Sci.* (Band 6), Nr. 2, Seite 189-230.
- Ojemann, G. A. und Whitaker, H. A. (1978): The bilingual brain, *Arch.Neurol.* (Band 35), Nr. 7, Seite 409-412.
- Osterhout, L. (1997): On the brain response to syntactic anomalies: manipulations of word position and word class reveal individual differences, *Brain Lang.* (Band 59), Nr. 3, Seite 494-522.
- Palij, M. (1990): Acquiring English at different ages: the English displacement effect and other findings, *J.Psycholinguist.Res.* (Band 19), Nr. 1, Seite 57-70.
- Pallier, C.; Dehaene, S.; Poline, J. B.; LeBihan, D.; Argenti, A. M.; Dupoux, E. und Mehler, J. (2003): Brain imaging of language plasticity in adopted adults: can a second language replace the first?, *Cereb.Cortex* (Band 13), Nr. 2, Seite 155-161.
- Papousek, M. (2001): Vom ersten Schrei zum ersten Wort, Huber, Bern, ISBN: 3456824963.
- Paradis, M. (1994): Neurolinguistic aspects of implicit and explicit memory: implications for bilingualism, Ellis, N., *Implicit and explicit learning of second languages* , Seite 393-419, Academic Press, London.
- Paradis, M. (1995): *Aspects of bilingual aphasia.*, Pergamon Press, Oxford.
- Paradis, M. (2000): Generalizable outcomes of bilingual aphasia research, *Folia Phoniatr.Logop.* (Band 52), Nr. 1-3, Seite 54-64.
- Perani, D.; Dehaene, S.; Grassi, F.; Cohen, L.; Cappa, S. F.; Dupoux, E.; Fazio, F. und Mehler, J. (1996): Brain processing of native and foreign languages, *Neuroreport* (Band 7), Nr. 15-17, Seite 2439-2444.
- Perani, D.; Paulesu, E.; Galles, N. S.; Dupoux, E.; Dehaene, S.; Bettinardi, V.; Cappa, S. F.; Fazio, F. und Mehler, J. (1998): The bilingual brain. Proficiency and age of acquisition of the second language, *Brain* (Band 121), Nr. Pt 10, Seite 1841-1852.
- Pessoa, L.; Kastner, S. und Ungerleider, L. G. (2002): Attentional control of the processing of neural and emotional stimuli, *Brain Res.Cogn Brain Res.* (Band 15), Nr. 1, Seite 31-45.
- Petsche, H.; Etlinger, S. C. und Filz, O. (1993): Brain electrical mechanisms of bilingual speech management: an initial investigation, *Electroencephalogr.Clin.Neurophysiol.* (Band 86), Nr. 6, Seite 385-394.
- Pinango, M. M. und Zurif, E. B. (2001): Semantic operations in aphasic comprehension: implications for the cortical organization of language, *Brain Lang.* (Band 79), Nr. 2, Seite 297-308.

- Pinker, S. (1994): *The Language Instinct: How the Mind Creates Language*, William Morrow and Co., New York.
- Prüfungen Deutsch als Fremdsprache (1998): Einstufungstest 6, Einstufungstests für Anfänger- und Fortgeschrittenenkurse: Deutsch als Fremdsprache , Prüfungen Deutsch als Fremdsprache. Auflage, Seite 55-64, Verlag für Deutsch, Ismaning, Germany.
- Raichle, M. E. (1998): Behind the scenes of functional brain imaging: a historical and physiological perspective, *Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A* (Band 95), Nr. 3, Seite 765-772.
- Ramamurthi, B. und Chari, P. (1993): Aphasia in bilinguals, *Acta Neurochir.Suppl* (Wien.) (Band 56), Seite 59-66.
- Roder, B.; Stock, O.; Neville, H.; Bien, S. und Rosler, F. (2002): Brain activation modulated by the comprehension of normal and pseudo-word sentences of different processing demands: a functional magnetic resonance imaging study, *Neuroimage* (Band 15), Nr. 4, Seite 1003-1014.
- Rodriguez-Fornells, A.; Rotte, M.; Heinze, H. J.; Nosselt, T. und Munte, T. F. (2002): Brain potential and functional MRI evidence for how to handle two languages with one brain, *Nature* (Band 415), Nr. 6875, Seite 1026-1029.
- Rubinstein, J. T. (2002): Paediatric cochlear implantation: prosthetic hearing and language development, *Lancet* (Band 360), Nr. 9331, Seite 483-485.
- Schlosser, M. J.; Aoyagi, N.; Fulbright, R. K.; Gore, J. C. und McCarthy, G. (1998a): Functional MRI studies of auditory comprehension, *Hum.Brain Mapp.* (Band 6), Nr. 1, Seite 1-13.
- Schlosser, M. J.; Luby, M.; Spencer, D. D.; Awad, I. A. und McCarthy, G. (1999): Comparative localization of auditory comprehension by using functional magnetic resonance imaging and cortical stimulation, *J Neurosurg.* (Band 91), Nr. 4, Seite 626-635.
- Schlosser, R.; Hutchinson, M.; Joseffer, S.; Rusinek, H.; Saarimaki, A.; Stevenson, J.; Dewey, S. L. und Brodie, J. D. (1998b): Functional magnetic resonance imaging of human brain activity in a verbal fluency task, *J Neurol.Neurosurg.Psychiatry* (Band 64), Nr. 4, Seite 492-498.
- Schwartz, M. S. (1994): Ictal language shift in a polyglot, *J Neurol.Neurosurg.Psychiatry* (Band 57), Nr. 1, Seite 121.
- Seidenberg, M. S. (1997): Language acquisition and use: learning and applying probabilistic constraints, *Science* (Band 275), Nr. 5306, Seite 1599-1603.
- Shmuel, A.; Yacoub, E.; Pfeuffer, J.; van de Moortele, P. F.; Adriany, G.; Hu, X. und Ugurbil, K. (2002): Sustained negative BOLD, blood flow and oxygen consumption response and its coupling to the positive response in the human brain, *Neuron* (Band 36), Nr. 6, Seite 1195-1210.
- Sigman, M. und Cecchi, G. A. (2002): Global organization of the Wordnet lexicon, *Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A* (Band 99), Nr. 3, Seite 1742-1747.
- Singh, J. (1964): *Die Wolfskinder von Midnapore*, Quelle & Meyer, Heidelberg.
- Stromswold, K.; Caplan, D.; Alpert, N. und Rauch, S. (1996): Localization of syntactic comprehension by positron emission tomography, *Brain Lang.* (Band 52), Nr. 3, Seite 452-473.
- Talairach, J. und Tournoux, P. (1988): *Co-planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain*, Thieme, Stuttgart.



- Ugurbil, K.; Hu, X.; Chen, W.; Zhu, X. H.; Kim, S. G. und Georgopoulos, A. (1999): Functional mapping in the human brain using high magnetic fields, *Philos.Trans.R.Soc.Lond B Biol.Sci.* (Band 354), Nr. 1387, Seite 1195-1213.
- Ugurbil, K.; Toth, L. und Kim, D. S. (2003): How accurate is magnetic resonance imaging of brain function?, *Trends Neurosci.* (Band 26), Nr. 2, Seite 108-114.
- Ullman, M. T. (2001a): A neurocognitive perspective on language: the declarative/procedural model, *Nat.Rev.Neurosci.* (Band 2), Nr. 10, Seite 717-726.
- Ullman, M. T. (2001b): The declarative/procedural model of lexicon and grammar, *J Psycholinguist.Res.* (Band 30), Nr. 1, Seite 37-69.
- Ullman, M. T. (2001c): The neural basis of lexicon and grammar in first and second language: the declarative/procedural model, *Bilingualism Lang.Cog.* (Band 4), Seite 105-122.
- Ullman, M. T.; Corkin, S.; Coppola, M.; Hickok, G.; Growdon, J. H.; Koroshetz, W. J. und Pinker, S. (1997): A neural dissociation within language: evidence that the mental dictionary is part of declarative memory, and that grammatical rules are processed by the procedural system, *J Cogn.Neurosci.* (Band 9), Nr. 2, Seite 266-276.
- van den Heuvel, O. A.; Groenewegen, H. J.; Barkhof, F.; Lazeron, R. H.; van Dyck, R. und Veltman, D. J. (2003): Frontostriatal system in planning complexity: a parametric functional magnetic resonance version of Tower of London task, *Neuroimage.* (Band 18), Nr. 2, Seite 367-374.
- van der Lely, H. K. und Christian, V. (2000): Lexical word formation in children with grammatical SLI: a grammar-specific versus an input-processing deficit?, *Cognition* (Band 75), Nr. 1, Seite 33-63.
- van der Lely, H. K.; Rosen, S. und McClelland, A. (1998): Evidence for a grammar-specific deficit in children, *Curr.Biol.* (Band 8), Nr. 23, Seite 1253-1258.
- VanDongen, H. R.; Loonen, C. B. und VanDongen, K. J. (1985): Anatomical basis for acquired fluent aphasia in children, *Ann.Neurol.* (Band 17), Nr. 3, Seite 306-309.
- Vargha-Khadem, F.; Carr, L. J.; Isaacs, E.; Brett, E.; Adams, C. und Mishkin, M. (1997): Onset of speech after left hemispherectomy in a nine-year-old boy, *Brain* (Band 120 ( Pt 1)), Seite 159-182.
- Villringer, A. (1997): Understanding functional neuroimaging methods based on neurovascular coupling, *Adv.Exp.Med.Biol.* (Band 413), Seite 177-193.
- Villringer, A. und Dirnagl, U. (1995): Coupling of brain activity and cerebral blood flow: basis of functional neuroimaging, *Cerebrovasc.Brain Metab.Rev.* (Band 7), Nr. 3, Seite 240-276.
- Wartenburger, I.; Heekeren, H. R.; Abutalebi, J.; Cappa, S. F.; Villringer, A. und Perani, D. (2003): Early setting of grammatical processing in the bilingual brain, *Neuron* (Band 37), Nr. 1, Seite 159-170.
- Weber-Fox, C. und Neville, H. J. (2001): Sensitive periods differentiate processing of open- and closed-class words: an ERP study of bilinguals, *J Speech Lang.Hear.Res.* (Band 44), Nr. 6, Seite 1338-1353.
- Weber-Fox, C. M. und Neville, H. J. (1996): Maturational Constraints on Functional Specializations for Language Processing: ERP and Behavioral Evidence in Bilingual Speakers., *J Cogn.Neurosci.* (Band 8), Nr. 3, Seite 231-256.
- Wermke, K.; Mende, W.; Manfredi, C. und Brusciaglioni, P. (2002): Developmental aspects of infant's cry melody and formants, *Med.Eng Phys.* (Band 24), Nr. 7-8, Seite 501-514.

Wernicke, C. (1874): Der aphasische Symptomenkomplex, Cohn & Weigert, Breslau.

Wu, J. L. und Yang, H. M. (2003): Speech perception of Mandarin Chinese speaking young children after cochlear implant use: effect of age at implantation, *Int.J.Pediatr.Otorhinolaryngol.* (Band 67), Nr. 3, Seite 247-253.

Yetkin, O.; Zerrin Yetkin, F.; Haughton, V. M. und Cox, R. W. (1996): Use of functional MR to map language in multilingual volunteers, *AJNR Am.J.Neuroradiol.* (Band 17), Nr. 3, Seite 473-477.

Zahn, R.; Huber, W.; Drews, E.; Erberich, S.; Krings, T.; Willmes, K. und Schwarz, M. (2000): Hemispheric lateralization at different levels of human auditory word processing: a functional magnetic resonance imaging study, *Neurosci.Lett.* (Band 287), Nr. 3, Seite 195-198.

## **Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen**

*	grammatikalische oder semantische Verletzung / Anomalie
BA	Brodmann Areal
EA	early acquisition, früher Zweitspracherwerb
EAHP	early acquisition high proficiency, früher Zweitspracherwerb und hohes Sprachleistungsniveau
EALP	early acquisition low proficiency, früher Zweitspracherwerb und niedriges Sprachleistungsniveau (adoptierte Kinder)
ERP	event-related potentials, evozierte elektrische Potentiale
EEG	Elektroenzephalogramm
fMRT	funktionelle Magnetresonanztomographie
gram.	grammatikalische Aufgabe
HP	high proficiency, hohes Sprachleistungsniveau
L1:	Erstsprache
L2:	Zweitsprache
L3:	Drittsprache
LA	late acquisition, später Zweitspracherwerb
LAHP	late acquisition high proficiency, später Zweitspracherwerb und hohes Sprachleistungsniveau
LALP	late acquisition low proficiency, später Zweitspracherwerb und niedriges Sprachleistungsniveau
LP	low proficiency, niedriges Sprachleistungsniveau
M	Mittelwert
MNI	Montreal Neurological Institute
MRT	Magnetresonanztomographie/Magnetresonanztomograph
N	Anzahl der Probanden
PET	Positronen Emissions Tomographie
sem.	semantische Aufgabe
SD	Standardabweichung
T	T-Wert Allgemeines Lineares Modell
U	U-Wert Mann-Whitney-Test
u.a.	unter anderem
Z	Z-Wert Wilcoxon-Test

## **Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen**

Nummer	Titel	Seite
Abbildung 1	Broca- und Wernicke-Areal	7
Abbildung 2	Das BOLD-Signal	24
Abbildung 3	Die Abfolge der Stimuli	30
Abbildung 4	Der Aufbau	31
Abbildung 5	Die Kopfspule	32
Abbildung 6	Die Schichtführung	33
Abbildung 7	Das Koordinatensystem	39
Abbildung 8	Verhaltensdaten	46
Abbildung 9	Vergleich der Gruppen beim grammatikalischen Urteilen in L2	49
Abbildung 10	Vergleich der Gruppen beim semantischen Urteilen in L2	51
Abbildung 11	Vergleich des grammatikalischen Urteilens L2 vs. L1 innerhalb der drei Gruppen	54
Abbildung 12	Vergleich des semantischen Urteilens L2 vs. L1 innerhalb der drei Gruppen	56
Abbildung 13	Schematisches Modell des Zweitspracherwerbs	75
Tabelle 1	Übersicht der funktionell bildgebenden Studien	13
Tabelle 2	Probanden	25
Tabelle 3	Effekt des Alters beim Zweitspracherwerb	26
Tabelle 4	Effekt des Leistungsniveaus	26
Tabelle 5	Versuchsplan	28
Tabelle 6	Parallelitätsprüfung der Gruppen in demographischen und anamnestischen Daten	42
Tabelle 7	Verhaltensdaten	45
Tabelle 8	Vergleich der Gruppen bei grammatikalischem Urteilen in L2	48
Tabelle 9	Vergleich der Gruppen bei semantischem Urteilen in L2	50
Tabelle 10	Vergleich des grammatikalischen Urteilens L2 vs. L1 innerhalb der drei Gruppen.	53
Tabelle 11	Vergleich des semantischen Urteilens L2 vs. L1 innerhalb der drei Gruppen	55

# Anhang

## Demographisch-anamnestischer Fragebogen 1

Name:		
Adresse:		
Telefon:		
Alter:		
Händigkeit (selbst und Familie):		
Beruf:		
Nationalität:		
aufgewachsen in:		
Nationalität der Mutter:		
Nationalität des Vaters:		
Italienisch erlernt im Alter von:		
Italienisch gesprochen	mit der Familie: ja / nein	
	im Kindergarten: ja / nein	
	in der Schule: ja / nein	
gesamte Aufenthaltsdauer in Italien (Jahre)		
Deutsch erlernt im Alter von:		
Deutsch gesprochen	mit der Familie: ja / nein	
	im Kindergarten: ja / nein	
	in der Schule: ja / nein	
gesamte Aufenthaltsdauer in Deutschland (Jahre)		

## Demographisch-anamnestischer Fragebogen 2

<b>Gebrauch beider Sprachen</b>	nur Italienisch  1	meist Italienisch selten Deutsch  2	oft Italienisch, wenigstens 25% Deutsch  3	gleicher Gebrauch beider Sprachen  4	oft Deutsch, wenigstens 25% Italienisch  5	meist Deutsch selten Italienisch  6	nur Deutsch  7
von 0 bis 7 Jahren							
von 7 bis 14 Jahren							
von 14 bis 18 Jahren							
von 18 Jahren bis jetzt							
in der Familie							
mit Freunden							
mit Partner/ Partnerin							
in Beruf/ Schule							
mit Kollegen/ Mitschülern							
in der Freizeit							
in Fernsehen/ Radio							
Lesen							

**Instruktion**

In dem folgenden Experiment wirst du deutsche und italienische Sätze lesen. Von den Sätzen sind einige semantisch oder grammatikalisch falsch. Semantisch falsche Sätze ergeben keinen Sinn oder sind bedeutungsleer, grammatikalisch falsche Sätze enthalten grammatikalische Fehler. Die Sätze werden in Gruppen (Blöcken) hintereinander gezeigt. Jeweils am Anfang eines solchen Blocks siehst du einen Satz der dir sagt, ob es in dem nächsten Block um semantische oder grammatikalische Fehler und um welche Sprache es geht.

Deine Aufgabe ist es zu entscheiden ob ein Satz richtig oder falsch ist. Bitte drücke NACH der Präsentation des Satzes auf die Maus. Du sollst also nach dem Satz in der Zeit, wo das Kreuz zu sehen ist, die Taste drücken.

Bitte überlege nicht, wie die falschen Sätze richtig heißen würden und versuche dich während der gesamten Untersuchung nicht zu bewegen.

Wir machen jetzt einen kleinen Probedurchlauf. Frage bitte, wenn dir irgendetwas nicht klar ist.

## **Lebenslauf**

Am 13.05.1973 wurde ich, Isabell Wartenburger, als Tochter von Werner Wartenburger und Annemarie Wartenburger, geb. Lindner, in Leipzig geboren.

Von 1979 bis 1989 besuchte ich die Wilhelm-Pieck-Oberschule Bad Dübén, von 1989 bis 1990 war ich auszubildende Herrenmaßschneiderin in Delitzsch. Von 1990 bis 1992 besuchte ich das Martin-Rinckart-Gymnasium Eilenburg, an dem ich 1992 das Abitur ablegte.

Zum Wintersemester 1992 nahm ich das Studium der Psychologie an der Universität Bielefeld auf, welches ich im Mai 1998 mit der Diplomprüfung beendete. Von 1998 bis 1999 war ich als Neuropsychologin in der Neurologischen Rehabilitations-Klinik Beelitz-Heilstätten tätig. Von 1999 bis 2001 erhielt ich ein Stipendium im Rahmen des Nachwuchsförderungsprogramms Berlins. Seitdem arbeite ich in der Neurologischen Klinik der Charité Berlin in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. med. A. Villringer. Seit 2002 bin ich Mitarbeiterin am Institut für Linguistik der Universität Potsdam in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. phil. R. De Bleser. Im Januar 2003 erhielt ich ein Stipendium im Rahmen der „International Leibniz Fellowships in Cognitive and Clinical Neurosciences“.



## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, Isabell Wartenburger, dass die hier vorliegende Dissertation zum Thema „Einfluss von Spracherwerbsalter und Sprachleistungsniveau auf die kortikale Repräsentation von Grammatik und Semantik in der Erst- und Zweitsprache“ von mir selbst und ohne die unzulässige Hilfe Dritter verfasst wurde. Die Dissertation stellt auch in Teilen keine Kopie anderer Arbeiten dar. Alle benutzten Hilfsmittel sowie die Literatur sind vollständig angegeben. Die Dissertation wird erstmalig und nur an der Humboldt-Universität zu Berlin eingereicht.

Isabell Wartenburger

Berlin, den 13.05.03